

Второе издание

**Введение
в экологическую
геотехнологию**

**Hsai-Yang Fang • Ronald C.
Chaney**

Second Edition

**Introduction to
Environmental
Geotechnology**

Hsai-Yang Fang • Ronald C. Chaney



CRC Press

Taylor & Francis Group

Boca Raton London New York

CRC Press is an imprint of the
Taylor & Francis Group, an Informa business

Второе издание

**Введение
в ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ
ГЕОТЕХНОЛОГИЮ**

**Hsai-Yang Fang • Ronald C.
Chaney**



CRC Press is an imprint of the
Taylor & Francis Group, an Informa business

Содержание

Предисловие ко второму изданию	x
Глава 1. Введение	1
1.1 Введение	1
1.2 Развитие экологической геотехнологии	1
1.2.1 Общее обсуждение	1
1.2.2 Рост населения и повышение уровня жизни	1
1.3 Цели экологической геотехнологии	3
1.4 Экологические циклы и их взаимодействие с геотехнологией	5
1.4.1 Общее обсуждение	5
1.4.2 Природная среда	5
1.4.2.1 Атмосфера	5
1.4.2.2 Биосфера	6
1.4.2.3 Гидросфера	7
1.4.2.4 Литосфера	7
1.4.2.5 Геомикробиосфера	7
1.4.3 Циклы природы	7
1.4.3.1 Кислородный цикл	7
1.4.3.2 Азотный цикл	8
1.4.3.3 Углеродный цикл	8
1.4.4 Стабильность воды в природных системах окружающей среды	8
Человеческая среда	8
1.5.1 Общее обсуждение	9
1.5.2 Твердые и жидкие отходы	10
1.5.3 Неорганические отходы (городской мусор)	11
1.5.4 Отходы резиновых шин	11
1.5.5 Загрязненная нефтью почва	11
1.6 Кислотный дождь и кислотный дренаж	12
1.6.1 Кислотный дождь (кислотное осаждение)	12
1.6.2 Шахтный кислотный дренаж	13
1.7 Экологические геотехнические проблемы	14
1.7.1 Свободные земли и пустыни	14
1.7.2 Краевые земли (болотистая местность)	15
1.7.3 Прибрежные поля	15
1.7.4 Эрозия почвы	16
1.8 Процессы загрязнения и взаимодействие почвы и загрязнителя	16
1.8.1 Общее обсуждение	16
1.8.2 Источники или пути загрязнения земли	16
1.8.3 Механизмы загрязнения	18
1.9 Энергетический экологический цикл	19
1.9.1 Общее обсуждение	19
1.9.2 Экологические геотехнические проблемы	19
1.10 Методы анализа экологических геотехнических проблем	19
1.10.1 Общее обсуждение	19
1.10.2 Обзор современных концепций механики грунтов	20
1.10.3 Предлагаемые подходы или методы оценки поведения почвы	21

1.10.3.1 Общее обсуждение	21
1.10.3.2 Инструкция	22
1.10.3.3 Лабораторные испытания	22
1.10.3.4 Интерпретация и анализ данных	23
1.11 Объем и организация текста	23
1.12 Резюме	24
Проблематика	24
Глава 2. Теория энергетического поля частиц и ее приложения	25
2.1 Введение	25
2.2 Теория энергетического поля частиц	25
2.2.1 Основы	25
2.2.2 Гипотезы	25
2.2.3 Элементарные частицы	26
2.2.4 Системы частиц	27
2.3 Энергетика, энергетическое поле и электроэнергетическое поле частиц	28
2.3.1 Энергии между частицами	28
2.3.1.1. Связь между частицами	28
2.3.1.2 Силы притяжения и отталкивания	29
2.3.2 Энергия и энергетические поля	29
2.3.3 Силовое поле частиц	29
2.3.4 Электронные поля и окружение	29
2.4 Состояния объединения идеализированных частиц	31
2.4.1 Общее обсуждение	31
2.4.2 Типы связей и энергетических диапазонов	32
2.4.3. Объемные отношения для идеализированных частиц	33
2.5 Кристалл – истинное твердое тело	34
2.5.1 Общее обсуждение	34
2.5.2 Кристаллическая симметрия	35
2.5.3 Кристаллические системы	36
2.5.4 Классы кристаллов	37
2.5.5 Кристаллические решетки	37
2.6 Гранулярные частицы и характеристики их структуры	39
2.6.1 Общее обсуждение	39
2.6.2 Измерение гранулированных частиц	39
2.6.2.1 Измерение размера	40
2.6.2.2 Измерение формы	40
2.6.3 Характеристики упаковки сыпучих материалов	40
2.6.4. Характеристика частиц и их первичная структура	41
2.6.4.1 Законы гранулометрии	41
2.6.4.2 Межчастичные силы	41
2.6.5 Системы упорядочения частиц	41
2.6.5.1. Однородная структура	41
2.6.5.2. Полигональные формы	42
2.6.5.3 Бинарные системы	42
2.6.5.4 Тройные системы	42
2.6.5.5 Непрерывные оценки	42
2.7 Химические основы	43
2.8 Феномен твердого тела, жидкости и газа на границе контакта	43

2.8.1. Однофазная граница контакта	44
2.8.2 Двухфазная граница контакта	44
2.8.3 Многофазная граница контакта	45
2.9 Поведение частиц под действием механического энергетического поля	47
2.9.1 Общее обсуждение	47
2.9.2 Процесс деформации нагрузки	47
2.9.3 Динамика частиц	49
2.10 Энергетическое поле нескольких сред	49
2.10.1 Общее обсуждение	49
2.10.2. Поле тепловой энергии	50
2.10.3. Электронные и магнитные энергетические поля	52
2.10.4 Радиационное энергетическое поле	52
2.11 Обоснование для применения в геотехнологии	52
2.12 Резюме	53
Проблематика	54
Глава 3. Природа почвы и окружающей среды	55
3.1 Почва как естественная генетическая система	55
3.2 Почва как полидисперсная система	55
3.2.1 Характеристика твердой фазы	56
3.2.2 Характеристика жидкой фазы	56
3.2.3. Характеристика границы контакта почва–воздух	56
3.2.4 Характеристики почвы в условиях <i>in situ</i>	58
3.3 Почвенная текстура, страта, горизонты и профили	58
3.3.1. Слои почвы и текстуры	58
3.3.2 Горизонты и профиль	59
3.3.3. Профили подзолистой почвы	59
3.3.4. Упрощенный профиль почвы и система горизонтов PCA	61
3.3.4.1 Общее обсуждение	61
3.3.4.2 Горизонты	61
3.4 Системы идентификации и классификации почв	63
3.4.1 Общее обсуждение	63
3.4.2. Унифицированная система классификации почв (ASTM D2487)	63
3.4.3. Система классификации почвы AASHTO (AASHTO M145-88)	64
3.4.4 Другие системы классификации почв	64
3.5 Система классификации почвы USDA	66
3.5.1 Общее обсуждение	66
3.5.2. Классы почв: зональные, интразональные и азональные	67
3.5.3. Большие почвенные группы и почвенные серии	67
3.5.3.1. Большая почвенная группа	67
3.5.3.2 Серия почв	67
3.5.4 Таксономия почвы	68
3.6 Химический состав природной почвы и глиновой фракции	69
3.6.1 Общее обсуждение	69
3.6.2 Общая химия почвы	69
3.6.3 Органическое вещество почвы	70
3.6.4. Соотношение силикагеля и полуторной окиси (SSR) фракции глины	71
3.7. Гранулярные почвы (галька, валун, гравий, песок и ил)	75
3.7.1 Общее обсуждение	75

3.7.2. Сводные показатели	76
3.7.3 Песок и гравий	76
3.7.4 Ил (0,02–0,002 мм)	77
3.8 Идентификация и характеристика загрязненных почв	77
3.8.1 Общее обсуждение	77
3.8.2. Визуальная идентификация загрязненных почв	79
3.8.3. Цвет грунта и воды	79
3.8.3.1 Цвет грунта	79
3.8.3.2 Цвет воды и характеристики водяных пузырей	80
3.8.4. Запахи в окружающей среде	80
3.8.4.1 Обсуждение	80
3.8.4.2. Запах природных или побочных газов	81
3.8.4.3 Запах почвы и воды	81
3.8.5. Модели растрескивания почв	82
3.8.6. Свойства, используемые для характеристики загрязненной почвы	82
3.9 Классификация загрязненных почв	83
3.9.1 Основная концепция	83
3.9.2 Чувствительность почвы к окружающей среде	85
3.9.3 Индекс чувствительности к загрязнению (PSI)	85
3.10 Пыль: микроскопические обломки	85
3.10.1 Общее обсуждение	85
3.10.2 Характеристики пыли	85
3.10.3 Пыль в окружающей среде	86
3.11 Суспензия: пыль в воде	87
3.11.1 Характеристики суспензии	87
3.11.2 Суспензия в окружающей среде	88
3.12 Резюме	88
Проблематика	89

Глава 4. Почвенная техника 91

4.1 Введение	91
4.2 Минералогия глины	91
4.2.1 Общее обсуждение	91
4.2.2 Требования к минералогическим данным	92
4.3 Структурные единицы почв	92
4.3.1 Общее обсуждение	92
4.3.2 Глинистые минеральные структуры	92
4.3.3 Идентификация и определение глинистых минералов	94
4.3.3.1. Рентгеноструктурный анализ (XRD)	95
4.3.3.2. Дифференциальный термический анализ (DTA)	95
4.3.3.3. Сканирующий электронный микроскоп (SEM)	96
4.4 Размер и форма измерения почвы	96
4.4.1. Эффективный размер и коэффициент однородности	96
4.4.2 Измерение размера и формы гранулированных почв	97
4.4.3 Площадь поверхности для мелкозернистой почвы	98
4.5 Связи частиц, энергии связи и соединения	99
4.5.1. Соединение частиц	99
4.5.2 Энергии связи	100
4.5.3 Связь между частицами	102

4.6 Межчастичные энергии или силы	102
4.6.1 Дипольный момент и эффект ориентации	102
4.6.2. Энергия или сила притяжения	104
4.6.2.1 Уравнение Норриша (1954)	104
4.6.2.2. Уравнение Макьюэна (1954)	104
4.6.2.3. Джордин и соавторы (1962) и уравнение Джордина (1963)	105
4.6.3. Энергия или сила отталкивания	105
4.6.3.1 Уравнение Полинга (1945, 1960)	105
4.6.3.2. Уравнение Ван Олфена (1954 г.)	106
4.7 Расположение частиц и глиновых конструкций	106
4.7.1. Расположение частиц и структуры	106
4.7.2 Изоморфное замещение	108
4.8 Ионообменная реакция и ионообменная емкость	108
4.8.1 Общее обсуждение	108
4.8.2 Характеристики и механизмы ионообменной реакции	109
4.8.2.1 Общее обсуждение	109
4.8.2.2 Механизмы ионообменной реакции	109
4.8.2.3 Ионообменная емкость	110
4.8.3. Факторы, влияющие на ИЕС	110
4.8.3.1 Размер частицы	110
4.8.3.2 Удельная площадь поверхности	110
4.8.3.3. Температура или тепловая энергия	112
4.8.3.4 Влияние размера ионов	112
4.8.3.5. Корреляция с другими параметрами	112
4.8.4 Анионный обмен	114
4.8.5 Ионообменная реакция в загрязненных почвенно-водных системах	114
4.8.5.1 Общее обсуждение	114
4.8.5.2 Ионообменная реакция между твердыми телами	116
4.8.5.3 Ионообменная реакция между фазами	116
4.9 Система глина–вода–электролит	116
4.9.1 Характеристики диффузного двойного слоя	116
4.9.2 Глиняная мицелла и ее структура	117
4.9.3 Свободная вода и экологическая вода	118
4.9.3.1 Адсорбированная вода	119
4.9.3.2 Осмотическая вода	119
4.9.3.3. Кристаллогидратная вода и гидратная вода	119
4.9.3.4 Ориентированная вода	119
4.10 Характеристики и структуры некоторых типичных минералов глины	119
4.10.1 Обсуждение	119
4.10.2. Группы каолинита, монтмориллонита и иллита	120
4.10.2.1. Группа каолинита	120
4.10.2.2. Группа монтмориллонита	121
4.10.2.3. Группа иллита	122
4.10.3 Хлориты и галлуазиты	122
4.10.3.1 Хлориты	122
4.10.3.2 Галлуазиты	122
4.10.4 Геотехнические свойства глинистых минералов	123
4.11 Гидрофильные и гидрофобные почвы	124
4.11.1 Общее обсуждение	124
4.11.2. Механизмы изменения гидрофобно-гидрофильных условий	125

4.11.3. Характеристика гидрофобных и гидрофильных почв	126
4.12 Гомоионные модификации (чистая почва)	126
4.12.1 Общее обсуждение	126
4.12.2 Способ приготовления образцов гомоионных почв	126
4.12.3 Типичные данные гомоионной модификации	127
4.13 Антропогенная почва	129
4.13.1 Общее обсуждение	129
4.13.2. Концепция антропогенной почвы и подход к ней	129
4.14 Резюме	131
Проблематика	132

Глава 5. Взаимодействие почвы-воды-воздуха в окружающей среде **133**

5.1 Введение	133
5.1.1 Общее обсуждение	133
5.1.2 Терминология увлажнения почвы	133
5.1.2.1 Суспензии	133
5.1.2.2 Гравитационная вода	133
5.1.2.3 Капиллярный диапазон	134
5.1.2.4 Гигроскопический диапазон и момент зажигания	134
5.1.3. Почвенно-водная система и ее измеримые параметры	135
5.2 Свойства воды	135
5.2.1 Молекулярные размеры и объемные свойства	135
5.2.2 Характеристики структуры воды	136
5.2.3 Химический состав воды	137
5.3 Свойства воды и водных веществ	138
5.3.1 Плотность, удельный вес и специальные характеристики воды	138
5.3.1.1 Плотность и удельный вес	138
5.3.1.2 Удельный вес	138
5.3.2 Поверхностное натяжение	138
5.3.3 Вязкость воды и других поровых жидкостей	139
5.3.3.1 Абсолютная или динамическая вязкость	139
5.3.3.2 Кинематическая вязкость	140
5.3.4 Диэлектрическая постоянная воды	141
5.4 Растворы, соединения, смеси и электролиты	142
5.4.1 Растворы, растворители и растворенные вещества	142
5.4.1.1 Растворы	142
5.4.1.2 Растворитель и растворенное вещество	142
5.4.2 Соединения и смеси	143
5.4.3 Электролиты	143
5.4.4 Кислотность и значение pH	144
5.5 Виды и источники воды	145
5.5.1 Грунтовые воды	145
5.5.2 Речные и озерные воды	146
5.5.3 Жесткие, мягкие, кислотные и щелочные воды	146
5.5.3.1 Жесткие и мягкие воды	146
5.5.3.2 Кислые и щелочные (основные) воды	146
5.6 Электрохимические характеристики системы почва–вода	148
5.6.1 Поверхностные электрохимические характеристики почвы	148
5.6.2 Пути потока, относящиеся к почвенно-водному взаимодействию	149

5.6.2.1	Путь потока – процесс смачивания	149
5.6.2.2	Путь потока – процесс высушивания	150
5.6.3.	Взаимодействие почвы и воды в различных областях энергетики	150
5.7	Взаимодействие почвы и воды в термическом энергетическом поле	150
5.7.1	Теплота смачивания	150
5.7.2	Способность водозабора	154
5.7.3	Кинетическая дисперсионная сила	154
5.8	Взаимодействие почвы–воды в электроэнергетическом поле	156
5.8.1	Поляризация	156
5.8.2.	Протонная миграция	156
5.9	Геоморфный процесс (процесс старения)	156
5.9.1	Концепция геоморфологического процесса	157
5.9.2	Механизмы геоморфологических процессов	158
5.9.2.1	Механические причины и кратковременный процесс	158
5.9.2.2	Химические и физико-химические процессы	158
5.9.2.3	Геомикробиологический процесс	159
5.9.2.4	Процесс почвообразования	161
5.10	Коррозионный процесс	162
5.10.1	Общее обсуждение	162
5.10.2.	Причины, типы и защита от коррозии	162
5.10.2.1	Общее обсуждение	162
5.10.2.2	Причины коррозии	163
5.10.2.3	Бактериальная коррозия	163
5.10.2.4	Защита от коррозии, пример защиты	163
5.11.	Влияние бактерий на поведение системы почва–вода	166
5.11.1	Характеристики бактерий	166
5.11.2	Взаимодействие почвы–воды–бактерий	166
5.12	Чувствительность почвы к окружающей среде	167
5.12.1	Общее обсуждение	167
5.12.2	Чувствительность почвы к нагрузке	167
5.12.3	Чувствительность почвы к поровой жидкости	170
5.13	Взаимодействие почва–вода–воздух	172
5.13.1	Поведение воздуха в почвенно-водной системе	172
5.13.2	Взаимодействие почва–вода–пар	173
5.14	Резюме	173
	Проблематика	174

Глава 6. Характеристики усадки, набухания и растрескивания почвы **175**

6.1	Введение	175
6.2	Усадка	175
6.2.1	Характеристики усадки почвы	175
6.2.2	Факторы, влияющие на усадку почвы	176
6.3	Характеристики набухания	179
6.3.1	Механизм набухания	179
6.3.2	Измерения набухания	179
6.3.3	Факторы, влияющие на характеристики набухания почвы	180
6.4	Сорбционные характеристики	182
6.4.1	Сорбция воды	182
6.4.2	Поглощение и степень насыщения	183

6.4.3 Поглощение органических молекул	183
6.5 Явление адсорбции	184
6.5.1 Типы адсорбции	185
6.5.1.1 Физическая адсорбция	185
6.5.1.2 Химическая или активированная адсорбция	185
6.5.2 Адсорбционный механизм	185
6.5.3 Измерения адсорбции	187
6.5.3.1 Абсорбция, относящаяся к FME	187
6.5.3.2 Абсорбция, относящаяся к SME	187
6.5.4 Адсорбционные характеристики в окружающей среде	187
6.5.4.1 Характеристики адсорбции	187
6.5.4.2 Полимерная адсорбция	188
6.5.4.3 Адсорбция опасных веществ	189
6.5.4.4 Адсорбционные и стабилизирующие материалы	189
6.6 Явление растрескивания и его механизмы	191
6.6.1 Явления растрескивания почвы	191
6.6.1.1 Общее обсуждение	191
6.6.1.2 Типы растрескивания почвы	191
6.6.1.2.1. Усадочное растрескивание	191
6.6.1.2.2. Термическое растрескивание	192
6.6.1.2.3. Растяжение трещин	192
6.6.1.2.4. Трещиностойкость	193
6.6.2 Механизмы растрескивания	193
6.6.2.1 Взаимосвязь трещин и разрушения	193
6.6.2.2 Взаимодействие трещин и влаги	193
6.6.2.2.1. Растрескивание, когда почва высыхает	194
6.6.2.2.2. Растрескивание, когда почва насыщена	194
6.6.3 Схема и размеры трещин	194
6.6.3.1 Процедура измерения структуры трещин (Метод Лихай)	194
6.6.3.1.1 Подготовка образца почвы	194
6.6.3.1.2 Элементы, подлежащие проверке с использованием теста на Растрескивание	195
6.6.3.2 Измерение внутреннего растрескивания почвы	196
6.6.3.3. Процесс растрескивания загрязненных почв	197
6.6.3.4 Структуры почвы, относящиеся к шаблонам трещин	197
6.7 Растительные характеристики почвы	198
6.7.1 Введение	198
6.7.2 Механизм прочности на растяжение почвы	199
6.7.3 Измерение прочности на растяжение почвы	200
6.7.4 Прочность на растяжение, связанная с другими константами почвы	201
6.7.4.1 Пределы и плотность Аттерберга	201
6.7.4.2 Индекс активности и выносливости	201
6.7.4.3 Прочность на сжатии	203
6.7.4.4 Угол сцепления и трения	204
6.7.4.5 Эффект обменных ионов	204
6.7.4.6 Классификация почвы на основе прочности на растяжение	204
6.8 Характеристика поверхности почвы	207
6.8.1 Введение	207
6.8.2 Применение линейной механики упругого разрушения (LEFM)	207
6.8.3 Лабораторные испытания почв на разрушение	208

6.8.3.1 Подготовка образца для испытаний	208
6.8.3.2 Измерения и вычисления G_c и K_c	208
6.8.3.3 Испытания на разрушение под нагрузкой, проведенные на табилизированных и загрязненных почвах	209
6.8.3.3.1 Мягкая морская глина	210
6.8.3.3.2 Разрушающая нагрузка на мелкозернистую почву	210
6.8.3.3.3 Нарушение разрушения на загрязненных мелкозернистых почвах	210
6.8.4 Выводы на основе данных о растрескивании и разрушении	213
6.8.4.1 Использование в качестве руководства в программе улучшения грунта	213
6.8.4.2 Схемы растрескивания, используемые для идентификации и характеристики почвы	214
6.8.4.3 Внутренние трещины, используемые для оценки нарушения почвы	214
6.9 Резюме	214
Проблематика	215

Глава 7. Гидропроводность и явления массопереноса **217**

7.1 Введение	217
7.2 Капиллярность	217
7.2.1 Общее обсуждение	217
7.2.2 Высота и скорость капиллярного подъема	217
7.2.2.1 Высота капиллярного подъема	217
7.2.2.2 Скорость капиллярного подъема	218
7.2.3 Факторы, влияющие на рост капилляров	219
7.2.3.1 Влияние времени и размера частиц почвы	219
7.2.3.2 Влияние влагосодержания и типов поровых флюидов	219
7.2.3.3 Влияние температуры	220
7.2.4 Капиллярные измерения	220
7.2.4.1 Общее обсуждение	220
7.2.4.2 Типичные результаты испытаний и комментарии к ним	220
7.3 Гидравлическая проводимость	221
7.3.1 Закон Дарси	221
7.3.2 Гидравлический напор и энергия	222
7.3.3 Гидравлические уравнения проводимости	223
7.3.3.1 Теоретические отношения	223
7.3.3.1.1. Уравнение Пуазейля–Хагена	223
7.3.3.1.2. Уравнение Козени–Кармана	223
7.3.3.1.3. Уравнение Винтеркорна (Winterkorn, 1942, 1963)	224
7.3.3.2 Эмпирические отношения	224
7.3.4 Гидравлические измерения проводимости	224
7.3.5 Факторы, влияющие на результаты проводимости	227
7.3.5.1 Общее обсуждение	227
7.3.5.2 Гидравлическая проводимость загрязненной почвы	227
7.3.5.3 Триакиальный пермеаметр для загрязненной жидкости пор	229
7.4 Инфильтрация, перколяция и водоудержание	231
7.4.1 Характеристики инфильтрации	231
7.4.1.1 Общее обсуждение	231
7.4.1.2 Скорость проникновения или емкость	232
7.4.2 Проникновение воды через поверхность дорожного покрытия	234
7.4.2.1 Инфильтрация воды через дорожное покрытие РСС	234

7.4.2.2 Проникновение воды через базовый курс	234
7.4.2.3 Проникновение воды через твердое и гибкое покрытие	234
7.4.3 Перколяция и удержание	235
7.5. Явления массового переноса во влажных мелкозернистых почвах	236
7.5.1 Ползучий поток	236
7.5.2 Природа порового флюида в почве	236
7.5.3 Сопряженный поток	238
7.5.3.1 Общее обсуждение	238
7.5.3.2 Измерения проводимости почвы	238
7.6 Осмос и обратный осмос	239
7.6.1 Явления осмоса	239
7.6.1.1 Общее обсуждение	239
7.6.1.2 Осмотические мембраны и осмотические давления	240
7.6.2 Осмотическое давление в почвах	240
7.6.2.1 Осмотическое течение в почвах	240
7.6.2.2 Осмотическое отталкивающее давление в почвах	241
7.6.3 Явление обратного осмоса	242
7.7. Всасывающее давление почвенной влаги и диффузивность	242
7.7.1 Всасывающее давление почвенной влаги	242
7.7.2. Диффузивность системы почва–вода	243
7.7.2.1 Общее обсуждение	243
7.7.2.2 Полевые измерения	243
7.8 Миграция влаги	245
7.8.1 Характеристика миграции влаги	245
7.8.2 Пределы миграции влаги	246
7.8.3 Факторы, влияющие на миграцию влаги в почвах	246
7.8.3.1 Возможные варианты	246
7.8.3.2 Пористость и удельная поверхность	247
7.8.3.3 Структура почвы	247
7.9 Явление диффузии	248
7.9.1 Общее обсуждение	248
7.9.2 Диффузионные явления в системе почва–вода	248
7.10 Движение в водной зоне	249
7.11 Резюме	249
Проблематика	251

Глава 8. Тепловые свойства почв 253

8.1 Введение	253
8.2 Характеристики тепла и источников тепла	253
8.2.1 Характеристики тепла	253
8.2.2 Источники тепла	253
8.2.3 Теплообмен у поверхности земли	254
8.3 Процесс передачи тепла и измеряемые тепловые параметры	254
8.3.1 Процесс теплопередачи	254
8.3.1.1 Кондукция	254
8.3.1.2 Конвекция	255
8.3.1.3 Радиационный процесс	255
8.3.2 Измеримые тепловые параметры	256
8.3.2.1 Общее обсуждение	256

8.3.2.2	Температура и теплота	256
8.3.2.3	Теплоемкость и удельная теплоемкость	258
8.3.2.4	Диффузность	258
8.4	Взаимодействие почвы–теплоты	258
8.4.1	Механизм почвенно-теплового взаимодействия	258
8.4.2	Тепловая емкость почвы	259
8.5	Теплопроводность и удельное сопротивление почвы	259
8.5.1	Теплопроводность	259
8.5.2	Тепловое сопротивление	260
8.5.2.1	Общее обсуждение	260
8.5.2.2	Практические аспекты теплового сопротивления	262
8.5.2.3	Влияние содержания влаги и плотности	262
8.6	Влияние теплоты или температуры на поведение почвы	263
8.6.1	Общее обсуждение	263
8.6.2	Характеристики почвенно-тепловой системы	263
8.6.3	Эффект поведения почвы в низкотемпературном диапазоне	264
8.6.3.1	Почвенные константы	264
8.6.3.2	Соотношение вес–влага для почвы	265
8.6.3.3	Сжимаемость	265
8.6.3.4	Давление поровой воды	266
8.6.3.5	Модуль и прочность на сдвиг	266
8.6.4	Влияние поведения почвы на среднетемпературный диапазон	268
8.6.5	Плавление	269
8.7	Замерзшие и оттаивающие почвы	270
8.7.1	Идентификация и описание льда в почве	270
8.7.2	Глубина проникновения холода и сдвиг	270
8.7.2.1	Аналитические подходы	270
8.7.2.2	Измерение <i>in situ</i>	272
8.7.2.3	Набухание из-за холода и скорость набухания	275
8.7.2.4	Индекс замерзания	276
8.7.3	Экологические геотехнические проблемы мерзлых грунтов	277
8.7.3.1	Геотехнические свойства и проблемы фундамента	277
8.7.3.2	Проблемы с обледенением	279
8.7.3.2.1	Обледенение на асфальте	279
8.7.3.2.2	Лед в реке или ручье	279
8.7.4	Характеристика оттаивания почвы	280
8.7.4.1	Общее обсуждение	280
8.7.4.2	Свойства оттаивающей почвы	280
8.8	Характеристики снега	281
8.8.1	Общее обсуждение	281
8.8.2	Свойства и проблемы снега	282
8.9	Резюме	283
	Проблематика	283
Глава 9.	Электрические свойства почв	285
9.1	Введение	285
9.2	Характеристики частиц и электроэнергии	285
9.2.1	Общее обсуждение	285
9.2.2	Электрическое поле и электрический заряд	286

9.3 Измеряемые параметры в системе почва–вода–электричество	286
9.3.1 Общее обсуждение	286
9.3.2 Электродвижущая сила и сопротивление	286
9.3.2.1 Электродвижущая сила	286
9.3.2.2 Сопротивление	287
9.3.3 Проводимость, конденсатор и емкость	287
9.3.3.1 Проводимость	287
9.3.3.2 Конденсатор	287
9.3.3.3 Емкость	287
9.4 Основы электрохимии почв	288
9.4.1 Общее обсуждение	288
9.4.2 Почвенно-электрохимическое взаимодействие и его измерение	288
9.4.2.1 Эвапотранспирация	289
9.4.2.2 Выщелачивание	289
9.4.3 Электрод и ячейка	289
9.4.4 Электролиз	290
9.4.4.1. Законы Фарадея	290
9.4.4.2 Блок Фарадея	290
9.5 Электролиты и электрические реакции	290
9.5.1 Характеристики электролитов	290
9.5.1.1 Соли и основания	290
9.5.1.2 Природные электролиты: кислотный дождь и кислотный дренаж	291
9.5.2 Электрод и окислительно-восстановительные реакции	291
9.5.2.1 Электродная реакция	291
9.5.2.2 Окислительно-восстановительная реакция	291
9.5.2.3 Окислительно-восстановительный потенциал	291
9.5.3 Характеристики E_h и p_e и их взаимосвязь	291
9.6. Электрические свойства почвы, воды и каменной горной породы (при применении дополнительной электроэнергии)	293
9.6.1 Механизм взаимодействия почва–электричество	293
9.6.2 Свойства, измеряемые электрическим током и напряжением	294
9.6.2.1 Свойства почвы и воды	294
9.6.2.2 Обнаружение протечки через геомембранный экран	294
9.6.2.3 Репликация почвенной ткани с использованием фактора формирования	294
9.6.3 Электрический заряд и плотность поверхностного заряда	297
9.6.3.1 Характеристики электрического заряда в почвенно-водной системе	297
9.6.3.2 Влияние электрической поверхностной плотности на почвенно-водную систему	298
9.6.4. Удельное электрическое сопротивление почвы, горных пород и воды	298
9.6.4.1 Общее обсуждение	298
9.6.4.2 Почва и горные породы	298
9.6.4.3 Качество воды, измеренное с помощью электрического сопротивления / проводимости	299
9.6.5. Электрические свойства загрязненной почвы	301
9.7 Диэлектрическая константа почвенно-водной системы	301
9.7.1 Характеристики диэлектрической проницаемости	301
9.7.2 Диэлектрическая проницаемость вещества	302
9.7.2.1 Общее обсуждение	302
9.7.2.2 Измерение диэлектрической проницаемости	302
9.7.2.3 Измерение электрической дисперсии	303

9.7.3. Диэлектрическая проницаемость воды и других поровых жидкостей	303
9.7.3.1. Диэлектрическая постоянная воды	303
9.7.3.2. Диэлектрическая постоянная в зависимости от значения pH	304
9.7.4. Влияние диэлектрической проницаемости на поведение почвы	305
9.7.4.1 Почвенные константы	305
9.7.4.2 Диэлектрическая постоянная, связанная с СЕС и дзета-потенциалом	305
9.7.4.3 Влияние диэлектрической проницаемости на проводимость и сжимаемость	306
9.7.4.4 Влияние диэлектрической проницаемости на набухание	306
9.8. Электропроводность и электрокинетические явления	308
9.8.1 Общее обсуждение	308
9.8.2. Выдвижение и усовершенствование теории Гельмгольца–Смолуховского	309
9.8.3. Обсуждение теории Гельмгольца–Смолуховского	310
9.8.3.1. Ограничения теории Гельмгольца–Смолуховского	310
9.8.3.2 Модификации и теория Гуи–Чепмена	310
9.8.4. Электрическая двухслойная толщина и дзета-потенциалы	311
9.8.4.1 Электрическая двухслойная толщина	314
9.8.4.2 Дзета-потенциал (ζ)	314
9.9 Улучшение почвы с электрокинетическим процессом	314
9.9.1 Характеристики и механизмы	314
9.9.2 Обезвоживание и стабилизация почвы	317
9.9.3 Факторы, влияющие на электрокинетический процесс	317
9.10. Деконтамирование почвы электрокинетическим процессом	318
9.10.1 Общее обсуждение	318
9.10.2 Механизм обеззараживания почвы	318
9.11 Электрофорез и электромиграция	319
9.11.1 Общее обсуждение	319
9.11.2 Экспериментальные измерения	320
9.12 Электрохимический процесс	321
9.12.1 Основы электрохимического процесса	321
9.12.2 Бюро мелиорации, используемый в США (USBR)	321
9.12.2.1 Подходы	321
9.12.2.2 Лабораторные условия: расчет осмотической проницаемости и удельного сопротивления	322
9.12.2.2.1 Осмотическая проницаемость	322
9.12.2.2.2 Удельное сопротивление (ρ)	322
9.12.2.2.3 Условия <i>in situ</i>	322
9.12.2.2.3.1 Сопротивление поля (R)	322
9.12.2.2.3.2 Объем сточных вод (Q)	323
9.13 Многоэнергетическое влияние на систему почва–вода	324
9.13.1 Общее обсуждение	324
9.13.2 Электровязкий эффект	325
9.13.3.1 Общее обсуждение	325
9.13.3.2 Лабораторные эксперименты	325
9.13.4 Электромагнитный эффект	326
9.13.4.1 Общее обсуждение	326
9.13.4.2 Характеристики электромагнитной силы	326
9.13.4.3 Лабораторные эксперименты	328
9.14 Резюме	329
Проблематика	329

10.1 Введение	331
10.1.1 Общее обсуждение	331
10.1.2 Обзор базовой ядерной физики и химии	331
10.2 Характеристика радиоактивности	333
10.2.1 Радиоактивный распад	333
10.2.2 Период полураспада, средняя продолжительность жизни и активность	333
10.2.3 Единицы радиоактивности	334
10.2.3.1 Кюри (Ки)	334
10.2.3.2 Беккерель (Бк)	335
10.2.3.3 Атомная единица массы (а.е.м., АМУ, u)	335
10.3 Радиоактивный процесс распада	335
10.3.1 Общее обсуждение	335
10.3.2 Законы о сохранении и процесс радиоактивного распада	336
10.3.2.1 Законы о сохранении в радиоактивном распаде	336
10.3.2.2 Процесс радиоактивного распада	336
10.3.2.2.1. Альфа-излучение (α)	336
10.3.2.2.2. Бета излучение (β)	336
10.3.2.2.3. Гамма излучение (γ)	336
10.3.3 Энергии излучения	336
10.4 Взаимодействие урана и радия с окружающей средой	337
10.4.1 Уран и радий	337
10.4.1.1 Уран (U)	337
10.4.1.2 Радий (Ra)	337
10.4.2. Взаимосвязь урана, радия и радона	337
10.5 Семейство благородных газов	338
10.5.1 Характеристики благородных газов	338
10.5.2 Радон и радоновое семейство	340
10.6 Экологические геотехнические аспекты излучения	341
10.6.1 Общее обсуждение	341
10.6.2 Взаимодействие воды – радиационное излучение	341
10.6.3 Взаимодействие горных пород – грунтов	343
10.6.3.1 Горные породы	343
10.6.3.2 Почва	345
10.7 Радиоактивно-токсический газ радон	346
10.7.1. Природа радонового газа	346
10.7.1.1 Общее обсуждение	346
10.7.1.2. Радоновый газ, здоровье человека и окружающая среда	348
10.7.2. Инженерные свойства радонового газа	348
10.7.2.1 Общее обсуждение	348
10.7.3. Радоновое излучение в горных породах или минералах	350
10.7.3.1 Общее обсуждение	350
10.7.3.2. Подход Гилетти и Кульпа (1955 г.)	350
10.7.3.2.1. Метод α -отдачи	350
10.7.3.2.2. Диффузионный процесс	350
10.7.3.2.3. Транспортировка	350
10.7.3.3 Метод α -отдачи (Fleischer и Mogro-Camero, 1978)	351
10.7.3.4 Экологический подход α -отдачи (Fang, 1990)	352

10.7.4	Механизмы взаимодействия радона с окружающей средой	352
10.7.4.1	Взаимодействие на основе молекулярной структуры радона	352
10.7.4.1.1	Низкая энергия ионизации	352
10.7.4.1.2	Несбалансированная избыточная тепловая энергия	353
10.7.4.2	Прямое взаимодействие частиц радона с молекулами воды	353
10.7.4.3	Взаимодействие через пыль-суспензию	354
10.8	Методы минимизации воздействия радона на окружающую среду	354
10.8.1	Минимизация воздействия радона пассивным способом	354
10.8.1.1	Американский метод EPA / DER	354
10.8.1.1.1	Рабочие уровни (WL)	355
10.8.1.1.2	Пикокюри на литр (пКи/л)	355
10.8.1.2	Обсуждения: преимущества и недостатки	355
10.8.2	Минимизация воздействия радона активным подходом	356
10.8.3	Методы мониторинга	357
10.8.3.1	Общее обсуждение	357
10.8.3.2	Коммерчески доступные методы (одобренные EPA-методы)	358
10.8.3.3	Измерения радона в приповерхностном слое почвы	358
10.8.3.4	Фотохимический метод	358
10.9	Утилизация ядерных отходов	360
10.9.1	Проблемный обзор	360
10.9.2	Источники и виды ядерных отходов	361
10.9.2.1	Основные источники ядерных отходов	361
10.9.2.2	Радиоактивные отходы высокой активности (HLRW)	361
10.9.2.3	Низкоактивные радиоактивные отходы (LLRW)	361
10.9.3	Управление ядерными отходами	361
10.9.4	Места утилизации и методы утилизации	363
10.9.4.1	Общее обсуждение	363
10.9.4.2	Места утилизации	363
10.9.4.3	Хранение радиоактивных отходов	363
10.9.4.4	Форма отходов и пути утечки	364
10.9.4.5	Комментарии к существующим отходам	364
10.10	Использование ядерной энергии для применения в строительстве	365
10.10.1	Общее обсуждение	365
10.10.2	Результаты исследований и решения безопасности	365
10.10.2.1	Результаты исследований	365
10.10.2.2	Соотношение пользы и затрат и решения безопасности	366
10.11	Другие применения	366
10.12	Резюме	367
	Проблематика	368

Глава 11. Сжимаемость почв и их поведение с учетом таких параметров, как напряжение, деформация, время

369

11.1	Введение	369
11.2	Уплотнение почв (денсификация)	369
11.2.1	Общее обсуждение	369
11.2.2	Теории уплотнения	370
11.2.2.1	Теория Проктора (1933)	371
11.2.2.2	Теория Гогентоглера (1937а)	371

11.2.2.3 Теория Ламбе (1958)	371
11.2.2.4. Теория уплотнения, основанная на теории поля энергии частиц	372
11.2.3 Влияние органики на уплотнение	372
11.2.4 Влияние легкого неорганического материала на уплотнение	376
11.2.5 Факторы, влияющие на результаты испытаний на уплотнение	378
11.3 Динамическая консолидация (динамическая денсификация)	381
11.3.1 Общее обсуждение	381
11.3.2. Соотношение нагрузки и деформации и эффективная глубина	382
11.3.2.1 Метод Менарда и Бруза (1975)	382
11.3.2.2 Модифицированный метод Леонардса и соавторов (1980)	382
11.3.2.3 Метод Лукаса (1980)	382
11.3.2.4. Метод Чарлза и соавторов (1981)	383
11.3.2.5 Метод Фанга–Эллиса (1983, 1995а)	383
11.4 Консолидация	384
11.4.1 Общее обсуждение	384
11.4.2. Теория консолидации Терцаги	385
11.5 Нормально уплотненные и сверхуплотненные глины	387
11.5.1 Общее обсуждение	387
11.5.2 Давление предварительной консолидации и коэффициент избыточной консолидации	387
11.5.2.1 Давление предварительной консолидации	387
11.5.2.2 Коэффициент избыточной консолидации (OCR)	387
11.5.2.3 Характеристики сдвига сверхконсолидированной глины	389
11.5.3 Факторы, влияющие на результаты испытаний консолидации	389
11.5.3.1 Температура или тепло	389
11.5.3.2 Поровая жидкость	389
11.5.3.2.1. Ненабухающая глина	389
11.5.3.2.2. Набухающая глина	390
11.5.3.3 Обменные ионы	390
11.6. Предварительная деформация и нарушенное состояние почвы	390
11.6.1 Характеристики почвы перед разрушением	390
11.6.2 Связь между условиями перед разрушением и во время разрушения	391
11.6.2.1. Стадия перед разрушением	392
11.6.2.2. Стадия от нагрузки до разрушения	392
11.7 Характеристики почвы: нагрузка, напряжение, прочность	392
11.7.1 Критерии разрушения	392
11.7.2 Типы испытаний на сдвиг	393
11.7.2.1 Стандартное испытание на сдвиг	393
11.7.2.2. Определение необработанных сдвиговых параметров из q_u и σ_c	393
11.7.3 Факторы, влияющие на прочность на сдвиг	394
11.7.3.1 Температура и концентрация электролита	394
11.7.3.2 Загрязненные поры	395
11.7.3.3 Ионообменная реакция	395
11.7.3.3.1. Испытания систем в равновесии с нормальным давлением	395
11.7.3.3.2 Испытания образцов, предварительно уплотненных при нормальных давлениях	398
11.7.4 Чувствительность, ползучесть и уменьшение напряжения почвы	400
11.7.4.1 Чувствительность	400
11.7.4.2 Влияние времени на поведение почвы	400
11.7.4.3 Поведение ползучести	402

11.7.4.3.1. Введение	402
11.7.4.3.2. Вязкоупругий модельный подход	405
11.7.4.3.3. Подход к процессу скоростий подход	406
11.7.4.3.4. Эмпирическ	407
11.7.4.4. Снятие напряжения	409
11.8. Остаточная прочность на сдвиг	410
11.8.1. Характеристики остаточной прочности на сдвиг	410
11.8.1.1. Общее обсуждение	410
11.8.1.2. Методы определения остаточной прочности	410
11.8.2. Данные об интерпретации остаточного сопротивления	410
11.8.3. Отношение остаточного сопротивления к другим параметрам почвы	412
11.8.3.1. Корреляция с содержанием глины и пределами Аттерберга	413
11.8.3.1.1. Глинистость	413
11.8.3.1.2. Верхний предел пластичности	413
11.8.3.1.3. Индекс пластичности	413
11.8.3.2. Корреляция с индексом ликвидности (LI)	413
11.8.3.2.1. Остаточная спаянность	413
11.8.3.2.2. Остаточный угол трения	413
11.8.3.3. Корреляция с приложенным нормальным напряжением	414
11.8.3.4. Корреляция с коэффициентом остаточного сопротивления (μ_r)	415
11.9. Динамика почвенных процессов	415
11.9.1. Динамический модуль сдвига и коэффициент демпфирования почв	415
11.9.1.1. Введение	415
11.9.1.2. Результаты эксперимента	415
11.9.2. Динамический модуль сдвига загрязненной почвы	422
11.10. Динамика взрывания	423
11.10.1. Общее обсуждение	423
11.10.2. Взрывная энергия и безопасные пределы	423
11.10.2.1. Безопасное расстояние и ускорение частиц	424
11.10.2.2. Соотношение энергии	424
11.10.2.3. Скорость частиц и масштабированное расстояние	424
11.10.2.4. Концепция интенсивности растрескивания Фанга–Кернера	424
11.10.2.5. Критерии безопасных границ взрывов	426
11.11. Резюме	428
Проблематика	429

Глава 12. Геотехнические инженерные области применения **431**

12.1. Введение	431
12.1.1. Общее обсуждение	431
12.1.2. Сфера экологической геотехнологии	431
12.1.3. Основные положения систем улучшения грунта	432
12.2. Критерии проектирования нагрузки экологического фактора	433
12.2.1. Критерии и подходы расчета коэффициента нагрузки	433
12.2.1.1. Критерии расчета коэффициента нагрузки	433
12.2.1.2. Подходы расчета коэффициента нагрузки	434
12.2.2. Экологические критерии расчета коэффициента нагрузки	434
12.2.2.1. Общее обсуждение	434
12.2.2.2. Факторы окружающей среды	434
12.2.2.3. Подходы к расчету коэффициента нагрузки на окружающую среду	435

12.3	Разница двух видов взаимодействия: почва–сооружение и сооружение–почва	435
12.3.1	Общее обсуждение	435
12.3.2	Взаимодействие сооружения и почвы	435
12.3.3	Взаимодействие почва–фундамент–сооружение	436
12.4	Нагрузка, фактор безопасности и допустимые условия	438
12.4.1	Нагрузки, в том числе нагрузки окружающей среды	438
12.4.1.1	Нагрузки	438
12.4.1.2	Нагрузки окружающей среды	439
12.4.2	Коэффициент безопасности и допустимые нагрузки	439
12.5	Допустимая нагрузка на почву	439
12.5.1	Отношение «нагрузка–фундамент»	440
12.5.2	Данные о допустимых нагрузках из строительных нормативов	441
12.6	Боковое давление грунта	441
12.6.1	Активное и пассивное давление грунта	441
12.6.2	Коэффициент давления грунта в состоянии покоя, K_0	443
12.6.3	K_0 для глинистой почвы и песка	443
12.6.3.1	Глинистая почва	443
12.6.3.2	K_0 для песка	444
12.7	Силы трения и углы между двумя материалами	444
12.7.1	Угол трения при взаимодействии почва–почва	444
12.7.2	Угол трения между грунтом и стеной	445
12.8	Фундамент на сваях	445
12.8.1	Характеристики свай	445
12.8.1.1	Общее обсуждение	445
12.8.1.2	Выбор типа сваи	446
12.8.1.3	Взаимодействие почвы и сваи в окружающей среде	447
12.8.1.4	Сопrotивление трению между сваями и почвой	447
12.8.2	Факторы окружающей среды, влияющие на состояние свай	447
12.8.2.1	Колебание уровня грунтовых вод	448
12.8.2.2	Температура грунта и циклы замерзания–оттаивания	448
12.8.2.3	Попадание загрязнений и эффект коррозии	448
12.8.2.4	Повреждение сваи в процессе ее забивки	448
12.8.3	Полевая инспекция свайных фундаментов	449
12.8.4	Особые типы свай и их использование	450
12.8.4.1	Общее обсуждение	450
12.8.4.2	Высококислотостойкие сваи	450
12.8.4.3	Сваи, используемые в особых условиях	451
12.8.4.4	Сваи, изготовленные из отходов или побочных продуктов	451
12.9	Проблемы подводных фундаментов	451
12.9.1	Подводная инспекция силовых конструкций	451
12.9.2	Обслуживание и ремонт подводных сооружений	452
12.9.2.1	Профилактика	452
12.9.2.2	Методы защиты от коррозии и технический ремонт	452
12.10	Процессы укрепления грунта и заделки трещин	453
12.10.1	Общее обсуждение	453
12.10.2	Процесс цементации и взаимодействие грунт–цемент	454
12.10.2.1	Затирка и инъекционные процессы	454
12.10.2.2	Взаимодействие грунт–цемент	454
12.10.3	Затирка, используемая для контроля опасных или токсичных отходов	455
12.10.3.1	Общее обсуждение	455

12.10.3.2 Затирочная система для контроля опасных или токсичных отходов	455
12.11 Резюме	456
Проблематика	456
Глава 13. Проблематичные почвы и горные породы	457
13.1 Введение	457
13.2 Сланцы и выветренные породы	457
13.2.1 Общее обсуждение	457
13.2.2 Камнеподобные и почвоподобные сланцы	458
13.2.3 Технические свойства сланцев	458
13.3 Остаточные почвы	460
13.3.1 Характеристики остаточных почв	460
13.3.2 Техническое поведение остаточных почв	462
13.3.3 Влияние окружающей среды на остаточные почвы	462
13.4 Набухающие глины	463
13.4.1 Общее обсуждение	463
13.4.2 Влияние факторов на набухание	464
13.4.3.1 Методы единого индекса	465
13.4.3.2 Идентификация на основе почвенных констант	466
13.4.3.3 Диэлектрический метод дисперсии	467
13.4.4 Свойства и проблемы обширных глиняных отложений	467
13.4.5 Черные хлопковые почвы	471
13.5 Органические почвы	471
13.5.1 Характеристики органических почв	471
13.5.2 Классификация органических почв	472
13.5.2.1 Классификация NRC (1969)	472
13.5.2.2 Классификация ASTM (1972)	472
13.5.2.3. Классификационная система штата Луизиана (1970)	474
13.5.3. Технические свойства органических почв	476
13.5.3.1 Содержание воды и почвенные константы	476
13.5.3.2. Проницаемость, сжимаемость и другие свойства	476
13.6 Карстовая область (карстовая воронка)	479
13.6.1 Общее обсуждение	479
13.6.2. Процессы и механизмы решения	479
13.6.3 Карстовая воронка и ее взаимодействие с окружающей средой	481
13.6.4. Действия, направленные на устранение карстовых воронок	482
13.7 Лессы (эолианские отложения)	482
13.7.1 Происхождение и распространение	482
13.7.2. Явление разрушаемости и его механизмы	483
13.7.3 Свойства и основные проблемы	484
13.8 Дисперсивные глины	485
13.8.1 Общее обсуждение	485
13.8.2 Процедуры идентификации	488
13.8.3 Свойства и основные проблемы	488
13.9 Латеритные почвы	488
13.9.1 Характеристика латеритной почвы	489
13.9.2 Свойства и основные проблемы	489
13.10 Озерные отложения и ленточные глины	491
13.10.1 Общее обсуждение	491

13.10.2 Мергели и туфы	491
13.10.3 Ленточная глина	492
13.10.3.1 Характеристики ленточных глин	492
13.10.3.2 Факторы окружающей среды, влияющие на образование ленточных глин	492
13.10.3.3 Механические свойства и основные проблемы ленточных глин	493
13.11 Солончаковые и сильно щелочные почвы	494
13.11.1 Общее обсуждение	494
13.11.2 Свойства и основные проблемы	494
13.12 Bentonитовые глины	495
13.12.1 Характеристики бентонитовых глин	495
13.12.2 Свойства и основные проблемы	496
13.13 Тефра, кораллы и морские раковины	497
13.13.1 Тефра (вулканический пепел)	497
13.13.2 Кораллы и морские раковины	498
13.14 Резюме	498
Проблематика	499

Глава 14. Водно-болотные угодья, прибрежные окраины и проблемы эрозии почвы **501**

14.1 Болотистые местности	501
14.1.1 Общее обсуждение	501
14.1.2 Определения, типы и классификации	502
14.1.2.1 Определения	502
14.1.2.1.1. Служба охраны рыбы и дикой природы США (FWS) (USDA, 1969)	502
14.1.2.1.2. Инженерный корпус армии США (1975)	502
14.1.2.1.3. Фонд экологических исследований Пенсильвании (PERF, 1982)	502
14.1.2.2 Типы и классификации водно-болотных систем	502
14.1.2.2.1. Болота	502
14.1.2.2.2. Топи	503
14.1.2.2.3. Трясины	503
14.1.3 Природные характеристики водно-болотных местностей	504
14.1.4 Рисовые поля (рукотворная заболоченная территория)	504
14.1.5 Экологические геотехнические проблемы водно-болотных местностей	505
14.1.5.1 Экологические эффекты	505
14.1.5.2 Инженерные трудности	505
14.2 Суша и прибрежные полосы	506
14.2.1 Общее обсуждение	506
14.2.2 Экосистема на суше и в прибрежной зоне	506
14.2.2.1 Общее обсуждение	506
14.2.2.2. Объекты для исследования прибрежных экосистем (LMER)	507
14.2.2.3. Устьевые характеристики объектов LMER	507
14.2.3 Основные параметры, необходимые для оценки	508
14.2.3.1 Общее обсуждение	508
14.2.3.2 Характеристики океанских волн	509
14.2.3.3 Климатологические и геоэкологические условия вдоль береговой линии	509
14.2.4 Экологические геотехнические проблемы	510
14.3 Пляжи и пляжная эрозия	510
14.3.1 Характеристики пляжей и пляжных песков	510
14.3.1.1 Характеристики пляжей	510

14.3.1.2	Характеристики пляжного песка	511
14.3.2	Проблемы эрозии и загрязнения пляжа	512
14.4	Проникновение соленой воды, эстуарии и эффект теплицы	513
14.4.1	Общее обсуждение	513
14.4.2	Лиманы и устьевые системы	513
14.4.3	Воздействие парникового эффекта на прибрежную среду	514
14.5	Морские осадки и проблемы морского дна	515
14.5.1	Морская среда	515
14.5.2	Свойства морской воды	516
14.5.3	Техническое поведение морских отложений	517
14.5.4	Загрязнение и загрязненные морские отложения	517
14.5.5	Морские сооружения и склоны	520
14.5.5.1	Морские сооружения	520
14.5.5.2	Склоны подводных отложений	520
14.6	Углубление дна и вынутый грунт	522
14.6.1	Общее обсуждение	522
14.6.2	Тематические исследования и методы управления	523
14.7	Эрозия почвы	524
14.7.1	Общее обсуждение	524
14.7.2	Причины и механизмы эрозии	525
14.8	Водная эрозия	527
14.8.1	Водная эрозия почвы	527
14.8.1.1	Оценка уравнения для расчета водной эрозии	527
14.8.1.2	Коэффициент увлажнения (R)	527
14.8.1.3	Коэффициент эрозии почвы (K)	527
14.8.1.4	Топографический коэффициент (LS)	528
14.8.1.5	Коэффициент контроля эрозии (VM)	528
14.8.2	Факторы, влияющие на водную эрозию	529
14.9	Ветровая эрозия	531
14.9.1	Ветровая эрозия почвы	531
14.9.1.1	Оценка ветровой эрозии	531
14.9.1.2	Фактор ветровой эрозии почвы (I')	531
14.9.1.3	Климатический фактор локальной ветровой эрозии (C')	531
14.9.1.4	Другие факторы	531
14.9.1.4.1	Коэффициент шероховатости поверхности почвы (K')	532
14.9.1.4.2	Вегетативный коэффициент (V')	532
14.9.1.4.3	Расстояние неэкранированного ветра (L')	532
14.10	Эрозионный контроль в строительных зонах	532
14.11	Резюме	533
	Проблематика	534

Глава 15. Оседание поверхности земли **535**

15.1	Введение	535
15.2	Характеристики и классификации земельной субсиденции	535
15.2.1	Характеристики оседания земли	535
15.2.2	Классификация оседания грунта	536
15.2.2.1	Геотехническая инженерная классификация	536
15.2.2.2	Генетическая классификация	537
15.2.2.2.1	Эндогенное оседание	537

15.2.2.2.2. Экзогенное оседание	537
15.3 Механизмы и явление оседания грунта	538
15.3.1 Ползучесть и прогрессирующие разрушения	538
15.3.2. Явления, связанные с оседанием	538
15.4 Основные естественные причины оседания грунта	539
15.4.1 Тектоническое движение и землетрясения	539
15.4.2 Флора и фауна почвы	540
15.4.3 Наводнения или ливни	542
15.5 Обезвоживание	543
15.5.1. Явление обезвоживания и его механизм	543
15.5.2 Распределение напряжения в процессе обезвоживания	544
15.5.2.1 Неограниченный водоносный горизонт	544
15.5.2.2 Замкнутый водоносный горизонт	545
15.5.2.3 Влияние откачки воды на глинистые слои	545
15.5.2.4 Коэффициент хранения	546
15.5.3 Прогнозирование оседания грунта	547
15.5.3.1. Общее обсуждение	547
15.5.3.2 Механизмы оседания вследствие обезвоживания	547
15.5.3.2.1. Оседание из-за первичной консолидации	547
15.5.3.2.2. Оседание из-за вторичной консолидации	548
15.5.4. Метод Терцаги и метод Зееварта	548
15.5.4.1. Метод Терцаги (Terzaghi и Peck, 1967)	548
15.5.4.1.1. Гипотезы	548
15.5.4.1.2. Формулы	548
15.5.4.2 Метод Зееварта (1972)	549
15.6 Оседание шахты	549
15.6.1 Общее обсуждение	549
15.6.2 Движение поверхности земли	551
15.6.2.1 Прерывистая деформация	551
15.6.2.2 Непрерывная деформация	552
15.6.2.2.1. Абсолютные смещения	552
15.6.2.2.2. Дифференциальные движения	552
15.6.3 Прогнозирование возможного повреждения поверхности	552
15.6.3.1 Общее обсуждение	552
15.6.3.2 Эмпирический метод	553
15.6.3.2.1. Принцип суперпозиции	553
15.6.3.2.2. Принцип эквивалентности	553
15.6.3.3 Метод функции профиля	553
15.6.3.4 Метод функции влияния	554
15.6.3.5 Феноменологический метод	555
15.6.4. Меры предосторожности при активных подземных выработках	555
15.6.4.1. Предохранительные столбцы	555
15.6.4.2 Контролируемый подрыв	556
15.6.4.3. Закладка выработанного пространства	556
15.6.4.4 Частичное извлечение	556
15.6.4.5 Быстрый подрыв	556
15.6.4.6 Специальная шахматная геометрия	557
15.6.4.7 Структурные меры предосторожности	557
15.6.5 Заброшенные шахты	557
15.6.5.1 Характеристики заброшенных шахт	557

15.6.5.2 Методы поддержки и структурные меры предосторожности	559
15.7 Строительные операции	560
15.7.1 Глубокие раскопки	560
15.7.2 Операция забивки свай	561
15.7.3. Динамическое уплотнение и взрывные работы	561
15.7.4 Оседание, вызванное местными условиями окружающей среды	561
15.7.4.1 Подземные проемы	561
15.7.4.2 Быстрая просадка	562
15.7.4.3. Утилизация опасных или токсичных отходов	562
15.7.4.3.1. Оседание из-за разложения почвы	562
15.7.4.3.2. Состояние измененной материи	562
15.7.4.3.3. Изменение структуры почвы и воды	562
15.8 Геоархеология и археоготехнология	562
15.8.1 Общее обсуждение	562
15.8.2 Типы и классификация проблем археологии	563
15.8.3 Природные и техногенные причины повреждения артефактов	564
15.8.4 Обследование участка, планирование, реконструкция и мелиорация	564
15.9 Резюме	566
Проблематика	566

Глава 16. Устойчивость склона Земли. Склоны и оползни. 567

16.1 Введение	567
16.2 Причины и явления, связанные с оползнями	567
16.2.1 Причины движения грунта	567
16.2.2. Явления, связанные с оползнем	568
16.3 Постепенное разрушение и поверхностный оползень	569
16.3.1 Общее обсуждение	569
16.3.2 Постепенное разрушение и поверхностный оползень	569
16.4 Методы анализа устойчивости склона	570
16.4.1 Общее обсуждение	570
16.4.2. Методы предельного равновесия и предельного анализа	570
16.4.2.1 Метод предельного равновесия	570
16.4.2.2 Метод предельного анализа	571
16.4.3 Выбор параметров прочности и коэффициента безопасности	571
16.4.3.1 Выбор параметров прочности	572
16.4.3.2 Коэффициент безопасности, F_s	572
16.4.4 Неопределенности и вероятность разрушения	573
16.5 Влияние дождя на устойчивость склона	574
16.5.1 Количество осадков и интенсивность осадков	574
16.5.2. Взаимодействие почвы и воды, относящееся к устойчивости склонов	575
16.5.2.1 Механизм, основанный на физико-химической концепции	575
16.5.2.2 Механизм, основанный на ионообменном эффекте	576
16.5.2.3. Механизм, основанный на концепции линейной механики упругого разрушения (LEFM)	576
16.5.2.4 Механизм, основанный на теории поля энергии частиц	577
16.5.3 Глубина насыщенной зоны (полоса увлажнения)	578
16.5.3.1 Глубина насыщенной зоны (без поверхностных трещин)	578
16.5.3.2 Исправление полосы смачивания из-за трещин на поверхности земли	580
16.6 Оползни на остаточных почвах и выветренных породах	581

16.6.1 Характеристики остаточной почвы	581
16.6.2. Тематическое исследование	581
16.6.2.1 Букараманга, Колумбия	581
16.6.2.2 Оползни в Гонконге, 1972 год	581
16.7 Оползни в регионах с дисперсионными и набухающими глинами	582
16.7.1 Области дисперсионных глин	582
16.7.2. Склоны из набухающей глины	583
16.8 Оползни на участках со сверхуплотненной глиной	584
16.8.1 Механизм разрушения в сверхуплотненных глинах	584
16.8.2 Обзор различных механизмов разрушения	585
16.8.3 Эколого-геотехнический подход	586
16.9 Оползни в результате землетрясений	587
16.9.1 Сползание склона на отмели	587
16.9.2 Глубокий обрыв склонов	588
16.10 Оползневая устойчивость склонов и проблема оползней в неблагоприятных условиях окружающей среды	588
16.10.1. Воздействие каротажных работ и корней деревьев	588
16.10.2. Влияние излишней срезки грунта или земляных работ	589
16.10.3. Влияние кислотного дождя и кислотного дренажа на устойчивость склона	590
16.10.4 Устойчивость морского склона (под водой)	590
16.11 Предотвращение оползней, контроль и восстановительные работы	591
16.11.1 Общее обсуждение	591
16.11.2 Сложные условия для почвы	591
16.11.2.1 Остаточные почвы	593
16.11.2.2 Лесс и ил	593
16.11.2.3 Трециноватые глины и сланцы	593
16.11.3. Тропический климат – землетрясение – городская среда	594
16.12 Генетическая диагностика оползней и инфраструктурных действий	594
16.12.1 Общее обсуждение	594
16.12.2 Генетический диагностический подход	595
16.12.3. Инфраструктурные мероприятия	595
16.12.3.1. Корневидная свая (Root Pile®)	596
16.12.3.2. Бамбуково-известковые композитные сваи	596
16.13 Районирование и микрорайонирование оползней	598
16.13.1 Районирование и микрорайонирование	598
16.13.2. Карта оползневого зонирования и микрозонирования	599
16.14 Резюме	599
Проблематика	600

Глава 17. Контроль твердых и жидких отходов и их утилизация 601

17.1 Введение	601
17.1.1 Общее обсуждение	601
17.1.2 Устойчивость городского мусора на полигоне	601
17.1.2.1 Устойчивость свежего мусора	601
17.1.2.2 Стабильность заброшенного полигона	602
17.1.3 Связь между твердыми и жидкими отходами	602
17.2 Характеристика городских отходов (мусора)	603
17.2.1 Разлагаемый мусор	603
17.2.2. Техническая классификация мусора	603

17.2.3. Рециклирование и рекуперация энергии из отходов	605
17.2.4. Инженерные проблемы полигонов	605
17.3 Прессование отходов	606
17.3.1 Общее обсуждение	606
17.3.2 Обзор санитарных полигонов	607
17.3.3 Процесс уплотнения поверхности	607
17.3.4. Глубинное уплотнение на полигонах	608
17.3.5 Контроль уплотнения	611
17.4 Устойчивость склона мусорного полигона	611
17.4.1 Характеристика склонов на полигоне	611
17.4.2 Механизмы разрушений на склоне	612
17.4.3 Анализ устойчивости склона	613
17.4.3.1 Текущая практика	613
17.4.3.2 Генетический диагностический подход	613
17.5 Лабораторные испытания спрессованного мусора	615
17.5.1 Характеристики напряжения, деформации, прочности	615
17.5.2. Параметры прочности и несущая способность	615
17.5.3. Гидравлическая проводимость	618
17.6 Устойчивость мусора в условиях стадии разложения	618
17.6.1 Основные соображения	618
17.6.2 Процессы разложения	619
17.6.3 Прогнозирование оседания	621
17.6.4. Типы загрязненной воды и производимые давления	621
17.6.4.1. Типы загрязненной воды, образующейся на полигонах	621
17.6.4.2. Кислотность на границе контакта глины и подкладки полигона	622
17.6.4.3. Экологическое давление, производимое на полигоне	623
17.6.4.4 Явление проводимости между полигоном и прокладкой	623
17.7 Основные критерии для проектирования системы контроля отходов	623
17.7.1 Общее обсуждение	623
17.7.2. Оценка существующего объекта и определение его состояния	624
17.7.3 Разработка программы локализации и утилизации	624
17.8 Компоненты системы управления отходами	625
17.8.1 Активные и пассивные компоненты	625
17.8.1.1 Активные компоненты	625
17.8.1.2 Пассивные компоненты	625
17.8.2 Структура компонентов системы управления	626
17.8.2.1 Барьерные стены	626
17.8.2.2. Бентонитовая суспензионная стена	626
17.8.2.3. Цементно-бентонитовое шпунтовое ограждение	627
17.8.2.4. Композитная система вертикального среза барьера	629
17.8.2.5 Стены с вибрирующими балками	629
17.8.3 Верхние уплотнения (шапки)	630
17.8.3.1 Шапки из натуральной глины	630
17.8.3.2 Бентонитовые глиняные шапки	631
17.8.3.3 Синтетические мембранные шапки	631
17.8.3.4 Другие средства контроля поверхностных вод	632
17.8.4 Нижняя изоляция (прокладка)	632
17.8.4.1 Глиняные подкладки	632
17.8.4.2 Бентонитовые глиняные подкладки	632
17.8.4.3 Геосинтетические мембранные подкладки	633

17.8.5 Двухкомпонентная система подкладок	633
17.8.5.1 Системы сбора сточных вод	633
17.8.5.1.1. Слой 1: фильтры (грунт или геотекстиль)	634
17.8.5.1.2. Слой 2: слив (гравий для основания, геокомпозит для боковых откосов)	634
17.8.5.1.3. Слой 3: протектор (геотекстиль или другое)	634
17.8.5.2. Первичная композитная подкладка (рисунок 17.18)	634
17.8.5.2.1. Слой 4: барьер (геомембрана)	634
17.8.5.2.2. Слой 5: барьер (геосинтетическая глиняная подкладка)	635
17.8.5.2.3. Слой 6: разделитель (геотекстиль или другое)	635
17.8.5.3 Система обнаружения утечек (рисунок 17.18)	635
17.8.5.3.1. Слой 7: слив (геосетка)	635
17.8.5.4. Вторичная композитная подкладка (рисунок 17.18)	635
17.8.5.4.1. Слой 8: барьер (геомембрана)	635
17.8.5.4.2. Слой 9: барьер (уплотненный слой грунта)	635
17.8.5.5. Слой 10: субстрат (почка или горная порода)	635
17.9 Факторы, влияющие на устойчивость систем управления отходами	636
17.9.1. Химическое воздействие и воздействие корней деревьев на подкладку	636
17.9.2. Утечка из непроницаемых грунтовых слоев почвы	637
17.9.3 Динамические эффекты нагрузки	639
17.9.4. Влияние близлежащих карстовых воронок и других объектов	640
17.10 Утилизация отходов для инженерных целей	640
17.10.1 Общее обсуждение	640
17.10.2. Технология переработки и повторного использования отходов	641
17.10.3 Отходы резиновых шин	642
17.10.3.1 Общее обсуждение	642
17.10.3.2 Текущая практика	642
17.10.3.3 Использование резины старых покрышек	643
17.10.3.3.1. Как наполнитель при строительстве	643
17.10.3.3.2. Ликвидация карстовых воронок	644
17.10.3.3.3. Резиновые подкладки из шин	644
17.10.3.3.4. Другие способы использования резиновых шин	644
17.10.4 Другие виды отходов	644
17.11 Нанотехнологии и системы материалов нового поколения	645
17.11.1 Общее обсуждение	645
17.11.2 Функция NIR и новые системы материалов	645
17.12 Резюме	646
Проблематика	647

Глава 18. Аридные земли, пустыни и меры по борьбе с опустыниванием 649

18.1 Введение	649
18.2 Характеристика пустынь и опустынивания	649
18.2.1 Определение	649
18.2.2 Пустыня и цивилизация	650
18.2.3 Социально-экономические последствия	651
18.2.4 Распределение пустыни	651
18.3 Экологические особенности пустыни	653
18.3.1 Климатические особенности	653
18.3.2. Вихревая пыль и пыль, переносимая на большие расстояния	655

18.3.3. Животные, деревья и прочая растительность	655
18.4 Характеристика пустынных почв	656
18.4.1 Профиль пустынных почв	656
18.4.2. Пустынная корка и пустынный панцирь	656
18.4.2.1 Пустынная корка	656
18.4.2.2 Пустынный панцирь	657
18.4.3 Подповерхностный слой почвы	657
18.4.4. Пойменная почва в пустынном регионе	657
18.4.5 Наводнения	658
18.5 Взаимодействие пустынных песков и тепла	659
18.5.1 Общее обсуждение	659
18.5.2. Термическое сопротивление пустынного песка	659
18.6 Взаимодействие песка и ветра в пустыне	661
18.6.1. Типы ветров и их причины	661
18.6.2 Механизмы взаимодействия песка и ветра	661
18.7 Характеристики песочных дюн	661
18.7.1 Общее обсуждение	662
18.7.2. Типы песчаных дюн и причины их образования	663
18.7.3 Характеристики движения песчаных дюн	663
18.8 Взаимодействие пустынных песков и вод	667
18.8.1 Характеристика воды в пустынном регионе	667
18.8.2 Поверхностные воды: озера и ручьи	667
18.8.3 Подземные водные ресурсы	667
18.8.4 Водные ресурсы и способы их сохранения	668
18.8.4.1 Общее обсуждение	668
18.8.4.2 Горизонтальные скважины и горизонтальные стоки	668
18.8.4.3 Подземные реки или ручьи	670
18.9 Расположение источника водоснабжения на основе концепции активной плоскости	670
18.9.1 Общее обсуждение	670
18.9.2. Концепция активных плоскостей	670
18.9.3 Процедуры для определения активных плоскостей	671
18.9.3.1 Определение типов и моделей разрушений	671
18.9.3.2. Верхний индекс (SI)	672
18.10 Антидезертификационные меры	673
18.10.1 Общее обсуждение	673
18.10.2 Предотвращение перемещения песка	673
18.10.3. Биотехническая стабилизация песчаных дюн	675
18.10.4. Защита коммуникаций от летучего песка	675
18.11 Резюме	677
Проблематика	678
Комментарии и выводы	679
Приложение. Обозначение и символы	681

Предисловие ко второму изданию

Прошло почти двадцать лет с тех пор, как в 1997 году было опубликовано первое издание. За этот период в задачах геотехнической инженерии произошел ряд значительных изменений, связанных с окружающей средой. По мере роста населения поддержание уровня жизни, а также рост промышленной деятельности привели к увеличению проблем загрязнения почвы, воды и воздуха. Чтобы сбалансировать циклы эксплуатации энергии – деградация окружающей среды – экологическая катастрофа, нам необходимо как можно лучше понять эти непредсказуемые и сложные системы окружающей среды. Изучение систем окружающей среды и их связи с инженерной деятельностью требует знаний из других дисциплин, охватывающих такие области, как почвоведение, физическая химия, минералогия, геология, микробиология и т. д. Поэтому разработка учебных программ по этому предмету должна быть междисциплинарной, и необходимо серьезно учитывать это. факт.

Экологическая геотехнология быстро развивалась с тех пор, как в 1986 году в Университете Лихай был организован первый международный симпозиум. Впоследствии, двенадцать международных симпозиумов были проведены в различных местах по всей Европе, Азии, Северной и Южной Америке и Африке. Эти симпозиумы представили как теоретические концепции, так и практические приложения к экологическим проблемам. Признавая влияние этого развития, многие университеты взяли на себя инициативу и установили экологическую геотехнологию в качестве стандартного курса со своими учебными планами.

В нижеследующем тексте авторы попытались обобщить свойства почвы или породы в различных условиях окружающей среды, используя концепции, представленные в теории энергетического поля частиц, которая основана на силах поверхности и тела. Эти силы являются результатом механической, тепловой, электрической, магнитной и радиационной энергий. Для всестороннего анализа воздействия почвы и породы на окружающую среду и практического применения в системах почва-фундамент-структура систематическая корреляция с экспериментальными данными считается обязательным условием, и эти аспекты составляют особенности этой книги. Второе издание пытается обновить материал и ссылки с учетом событий, которые произошли. Приложения также будут расширены, чтобы охватить применение геотехнических концепций окружающей среды, которые рассматривались во многих крупных проектах, таких как проекты железных дорог и автомагистралей в Тибете, перенос огромных паводковых вод с юга в засушливые районы на севере Китая, высокоскоростные железные дороги, построенные на сложных условия основания по всему Китаю и предварительные планы проекта строительства туннеля в Тайваньском проливе. Эти проекты включают в себя проектирование и строительство в различных сложных условиях, геологических ограничениях, больших высотах и чувствительных экологических средах. Стандартные геотехнические подходы не могут справиться в одиночку с этими нетрадиционными и многогранными проектами.

Основная цель этой книги – предоставить стандартный учебник, предназначенный для студентов, преподавателей и профессиональных инженеров

по экологической геотехнологии. В результате авторы считают необходимым, чтобы текст, охватывающий прикладную почвенную инженерию, широко охватывал области транспорта, океанской инженерии, водных ресурсов, мелиорации и других областей, представляющих интерес. В тексте также приведены практические справочные данные и методологии для анализа и проектирования.

Большая часть работ по развитию экологической геотехнологии проводилась в Университете Лихай в начале 1970-х годов. Финансовая поддержка для развития этой относительно новой области исследований была предоставлена Агентством по охране окружающей среды США (US EPA), Национальным научным фондом США (US NSF), Исследовательским отделом армии США, Американским институтом железа и стали (AIS), Шанхайским фондом HH Liu Foundation, Китайским международным центром по обмену культурой и экономикой Fujian и других агентств. Авторы хотели бы выразить свою благодарность профессорам Xiaohong Bai, Zhenfu Bian, John L. Daniels, Kenneth R. Demars, Jeffrey C. Evans, T. Cassia de Brito Galvao, Zhong-Xiong Hu, Hilary I. Inyang, Dr. Abidin Kaya, Dr. Homa Lee, Jai-Young Lee, Irene M. C. Lo, Guestavo Borel Menezes, Dr. Za-Chieh Moh, Vincent Ogunro, Robert W. Sarsby, Dr. Jouko Saarela, Bin Shi, Fusheng Wei, Zhuming Wu, Jian-hua Yin, Leonardo Zeevaert, and Thomas F. Zimmie..

Особая благодарность госпоже Eleanor Nothelfer за помощь в подготовке рукописи.

Hsai-Yang Fang
Ronald C. Chaney

1. Введение

1.1. ВВЕДЕНИЕ

Экологическая геотехнология может быть определена как междисциплинарная наука, изучающая почву и скалы и их взаимодействие с различными экологическими циклами, включая атмосферу, биосферу, гидросферу и литосферу, а также геомикробиосферу (Fang, 1986), которая включает деревья и прочую растительность, корни и бактериальную активность в грунтовой почве, равно как и последующую реакцию системы почва–вода на инженерную деятельность, как показано на рисунке 1.1.

1.2. РАЗВИТИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ

1.2.1. Общее обсуждение

Есть две основные причины для развития экологической геотехнологии. Во-первых, это рост населения, а во-вторых, повышение уровня жизни. Когда население увеличивается, требуется больше земли; многие залежи почвы, ранее считавшиеся непригодными для жилищного строительства и других строительных проектов, в настоящее время используются. В прогрессивном обществе рост уровня жизни указывает на рост промышленности. Как следствие, опасное загрязнение воздуха, воды, земли и городских отходов становится неизбежным, что ставит под угрозу глобальную окружающую среду. Чтобы справиться с проблемными отложениями в почвах и неблагоприятными условиями окружающей среды, в случае необходимости существующая традиционная технология строительства должна начать ориентироваться на новое направление.

Проблемные отложения почвы, с одной стороны, и проблемы загрязнения почвы, с другой, поставили под сомнение существующие концепции механики почвы и методы анализа поведения почвы в различных условиях окружающей среды. По этой причине экологические аспекты геотехнологии были расширены, и их последующая реакция на инженерную деятельность проложила путь к появлению экологической геотехнологии. Далее рассматриваются рост населения и промышленный прогресс.

1.2.2. Рост населения и повышение уровня жизни

В настоящее время (2016 г.) численность населения во всем мире превышает 7,4 млрд. человек. Согласно прогнозу ООН, по консервативным оценкам, к 2100 году население всех стран составит 11,1 миллиарда человек. Примерно 80 % этого роста будет приходиться на развивающиеся страны.

Истощение продуктивности сельскохозяйственных земель напрямую связано с ростом населения. Неконтролируемая городская экспансия, переустройство сельскохозяйственных земель для других целей, опустынивание и потеря

производительности – все это приводит к снижению производительности сельского хозяйства. Следовательно, требуется больше земли, и в настоящее время используются многие залежи почвы, ранее считавшиеся непригодными для жилищного строительства или других строительных проектов. К таким районам относятся свалки, водно-болотные угодья, зоны оседания рудников и т. д. Для преодоления этих естественных или искусственных проблемных почвенных условий требуются дополнительные методы для использования обычных строительных конструкций.

Когда общество прогрессирует, уровень жизни повышается, и, наряду с промышленным прогрессом, значительная часть воздуха, воды и земли загрязняется. Эти проблемы, а также другие проблемы, перечисленные в таблице 1.1, вызывают открытые свалки, химические и промышленные отходы. Давление неконтролируемой урбанизации, промышленного роста и уровня жизни способствовало минимизации практики обращения с экологическими отходами, увеличивая общую угрозу устойчивой базе экологических ресурсов.

Экологическая геотехнология быстро развивалась с тех пор, как в 1986 году в Университете Лихай был организован первый международный симпозиум. Впоследствии, в течение этого короткого промежутка времени, было проведено несколько международных, национальных и региональных конференций и симпозиумов по этой и другим смежным темам. На них были разработаны теоретические и практические концепции. Признавая влияние этого развития, многие университеты взяли на себя инициативу и установили экологическую геотехнологию в качестве стандартного курса в рамках своих учебных программ.

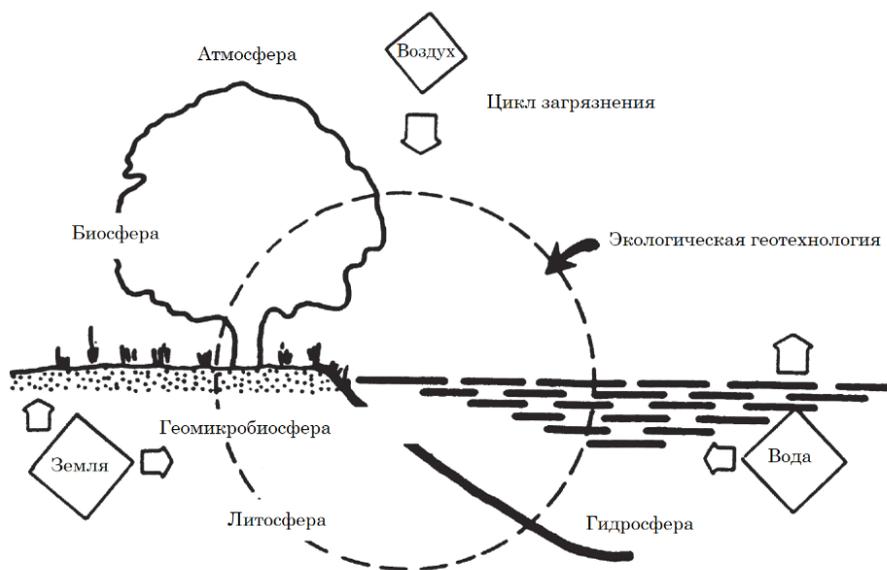


Рисунок 1.1. Экологические циклы и их взаимодействие.

Таблица 1.1. Некоторые причины загрязнения земель и подземных вод в США.

Промышленные отходы

Опасные химические отходы
Ядерные отходы
Нефтяное месторождение рассола
Кислотный дренаж
Кислотные дожди
Шоссейные противогололедные соли
Разлитие соленой воды
Заброшенные нефтяные скважины

Сельскохозяйственные отходы

Отходы животного происхождения
Ирригация обратного потока
Сухие сельскохозяйственные угодья
Утилизация скважины
Эвапотранспирация из растительности

Городские твердые отходы

Полигоны
Септики
Сброс сточных вод
Отходы лагун
Поверхностные изъятия

Прочие

Воды из зон разломов и воды вулканического происхождения
Радон газовый (Rn-222)
Разведка и разработка нефти

1.3. ЦЕЛИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ГЕОТЕХНОЛОГИИ

Экологическая геотехнология является новой дисциплиной, которая охватывает следующие предметы:

- геотехника;
- экология и инженерия;
- почвоведение (сельское хозяйство).

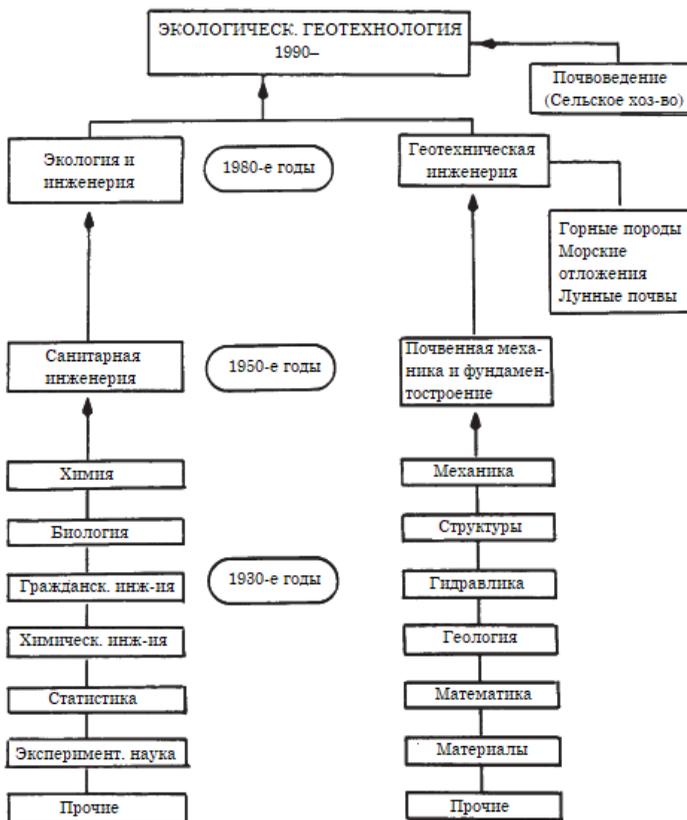


Рисунок 1.2. Экологическая геотехнология как развивающаяся наука (По материалам: Koerner, R. M. [1987], Proc. 1st Int. Symp. on Environmental Geotechnology, v. 2, pp. 1–3)

Как показано на рисунке 1.2, каждая из этих существующих в настоящее время дисциплин берет свое начало в 1950-х годах, от легко прослеживаемых корней, в частности, от сантехники, почвенной механики и фундаментостроения. Как видно из рисунка 1.2, произошла настоящая революция, направленная на то, чтобы создать эти дисциплины, основывавшихся на ряде тем, которые полностью сосредоточены в установленных областях. Действительно, революции 1930-х и 1950-х годов были бурными. Причины появления экологической геотехнологии очень практичны, логичны и благородны:

- лучшая производительность;
- здоровая экономика;
- безопасная и защищенная среда.

Перечисленное действительно является общими целями, и при правильном подходе к ним посредством единой дисциплины они взаимно инклюзивны. Создание этой новой дисциплины и причины ее появления связаны с природными ресурсами, такими как руды, топливо, вода и искусственные ресурсы, такие как

металлы, синтетика и полимеры, а также то, как они обрабатываются и транспортируются, и, наконец, как они и связанные с ними отходы обрабатываются, хранятся и утилизируются. Эти последние аспекты, конечно, лежат в основе загрязнения системы воздух–вода–грунт и взаимодействия ее частей.

Современное состояние образовательных и исследовательских программ в области экологической геотехнологии дано Meegoda (1996). Данная программа будет обучать инженеров разработке экологически обоснованных решений геотехнических задач и решению инженерных проблем окружающей среды, уникальных для почв и подземных условий. Программа разрабатывается Департаментом гражданского и экологического проектирования при Технологическом институте Нью-Джерси с грантом Национального научного фонда.

1.4. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ГЕОТЕХНОЛОГИЕЙ

1.4.1. Общее обсуждение

Природные и искусственные среды имеют большое разнообразие, как показано в таблице 1.1. Их взаимодействие, связанное с инженерно-геологическими проблемами, представлено на рисунке 1.3. На рисунке 1.3 указывается, что многие экологические геотехнические проблемы требуют знаний из других дисциплин, чтобы понять реакцию почвы на окружающую среду как для краткосрочных, так и для долгосрочных показателей. Чтобы связать эти несвязанные группы в связанную систему, в тексте введено понятие теории поля энергии частицы, как показано на рисунке 1.3. Детали концепции энергетического поля частицы будут обсуждаться в главе 2.

1.4.2. Природная среда

Как показано на рисунках 1.1 и 1.3, природная среда, включающая в себя тонкую оболочку, окружающую планету, охватывает атмосферу, биосферу, гидросферу и литосферу. Краткое описание каждой составляющей дано ниже.

1.4.2.1. Атмосфера

Атмосфера (от греч. atmos – пар) – это слой воздуха, окружающий Землю. Этот слой воздуха также делится на три подслоя.

1. Тропосфера: часть атмосферы, простирающаяся от поверхности Земли примерно до 12 км.

2. Стратосфера: часть атмосферы, простирающаяся от 12 км до 50 км.

3. Ионосфера: часть атмосферы выше 50 км.

Атмосфера является наиболее плотной у поверхности земли и уменьшается в плотности при движении в сторону космоса. Это означает, что плотность воздуха в тропосфере более высокая, чем в стратосфере, а плотность воздуха в

стратосфере ниже, чем в ионосфере. Воздух – это гомогенная смесь газов. Основными компонентами сухого воздуха (в процентах по объему) являются:

- азот (N_2) – 78,1 %;
- кислород (O_2) – 21,0 %;
- углекислый газ (CO_2) – 0,03 %;
- благородные газы – 0,86 % (см. раздел 10.5).

Атмосфера также содержит различное количество водяного пара и пыли (см. раздел 3.8). Количество водяного пара варьируется от небольших количеств в пустынных районах (см. раздел 18.6) до больших количеств в тропических регионах.



Рисунок 1.3. Взаимодействие почва–вода–среда связано с геотехническими проблемами, а также с использованием теории энергетического поля частиц в качестве моста, объединяющего эти несвязанные группы в единую систему.

1.4.2.2. Биосфера

Биосфера (от греч. bio – жизнь) включает в себя все живые организмы – растения и животные. Как показано на рисунке 1.1, она центрируется вблизи границы раздела между литосферой и гидросферой. Основными элементами, из которых состоит живое вещество, являются кислород, водород и углерод. Биосфера может быть разделена на три подцикла – кислородный, азотный и углеродный. Это будет более подробно обсуждаться в разделе 1.4.3.

1.4.2.3. Гидросфера

Гидросфера (от греч. hydro – вода) включает в себя огромное количество воды в океанах, реках, озерах и подземных отложениях, воду, содержащуюся во льдах и снегах Земли, а также воду, которая образует облака и пары в атмосфера. Гидросфера содержит растворенные газы и частицы литосферы. Вода из гидросферы покрывает и проникает в части литосферы.

1.4.2.4. Литосфера

Литосфера (от греч. litho – камень) относится в основном к камням и почве и содержит в своем составе кремний, кислород, алюминий и многие другие элементы. Химический состав земной коры и горизонтов А и В будет представлен в таблицах 3.7 и 3.8. Дальнейшие обсуждения этого аспекта будут представлены в главе 3.

1.4.2.5. Геомикробиосфера

Геомикробиосфера является новым термином и не входит в основную биосферу. Однако такая система необходима в области экологической геотехнологии для изучения характеристик корней древесной растительности и бактериальной активности в грунтовой почве и воде и последующей реакции на Техническое поведение системы почва–вода. Дальнейшие обсуждения будут представлены в разделах 5.9 и 5.10.

Поскольку эти системы взаимосвязаны и образуют окружающую среду, их называют экосферой (от греч. oikos – house). Процентное содержание элементов в экосфере представлено в таблице 3.8.

1.4.3. Циклы природы

Многие элементы в экосфере обмениваются между двумя или более подсферами. Эти обмены являются результатом физического или физико-химического взаимодействия атомов или молекул. Такие циклические обмены называются естественными циклами. Существуют три цикла – кислородный, азотный и углеродный, они кратко описываются далее.

1.4.3.1. Кислородный цикл

В земле кислород содержится в сочетании с кремнием (Si) и алюминием (Al) в силикатах алюминия (горных породах). Также он находится в сочетании с металлами, карбонатами, сульфатами, нитратами и фосфатами. Кислородные процессы, происходящие в биосфере, стимулируют обмен кислорода между различными частями среды. Кроме того, молекулярный кислород используется при биологическом окислении, при котором молекулы пищи превращаются в углекислый газ и воду. Три вещества – вода (H₂O), диоксид углерода (CO₂) и молекулярный кислород, наряду с молекулами живых систем, являются основными веществами в кислородном цикле.

1.4.3.2. Азотный цикл

Азот является четвертым наиболее распространенным элементом в биосфере после углерода, водорода и кислорода. Азотный цикл включает перенос азота между атмосферой, биосферой, литосферой и гидросферой в различных химических формах. В азотном цикле процесс фиксации азота имеет важное значение для утилизации микробов. Процессы фиксации превращают инертный N_2 в пригодную для использования форму, такую как нитрат-ион (NO_3^-), перерабатываемый растениями в белки и аминокислоты. Фиксация азота описывается в естественных жизненных циклах бактерий (раздел 5.8), которые преобразуют N_2 в аммиак (NH_3) и другие пригодные для использования формы. Другие бактерии превращают аммиак в нитрит-ион (NO_2^-). Производство фиксированного азота включает реакцию N_2 с кислородом из воздуха или с водородом из воды или метана (CH_4 , гидраты) с образованием аммиака.

1.4.3.3. Углеродный цикл

Углеродный цикл имеет важное значение для биосферы. Основным циклом является окисление углеродсодержащих материалов в атмосферный CO_2 с фотосинтезом, возвращающим его в биосферу. Наиболее важные особенности углеродного цикла перечислены ниже.

1. Количество углерода, «зафиксированного» растениями, окисляется до CO_2 .

2. Существует большой резервуар углерода в виде карбоната в осадочных породах, таких как известняк и доломит.

3. Углерод высвобождается в результате сжигания ископаемого топлива, что приводит к увеличению концентрации CO_2 в атмосфере.

Недавнее исследование развития глобального углеродного цикла дано в издании Post и соавторов (1990). Все естественные циклы взаимосвязаны. Трудно предсказать, какие изменения происходят в одном цикле из-за изменений в другом.

1.4.4. Стабильность воды в природных системах окружающей среды

Стабильность воды напрямую связана с природными системами окружающей среды. Верхний и нижний пределы стабильности воды характеризуются значениями E_h и pH, как пишут Garrels и Christ (1965) и как показано на рисунке 1.4. Значение E_h и pH будет объяснено в главе 5. Как показано на рисунке 1.4, естественная среда делится на два предела – верхний и нижний пределы устойчивости воды. Существуют два состояния окружающей среды: одно – это среда, находящаяся в контакте с атмосферой, а другое изолировано от атмосферы. Под водными контактами с атмосферой подразумевают дождевую воду, ручьи, шахтную воду и океаническую воду. Вода, выделенная из атмосферы, покрывает заболоченные почвы, богатые органическими веществами. Диапазон кислотных дождей, характеризуемый значениями E_h и pH, также указан на рисунке. Значения E_h и pH являются важными параметрами для характеристики приблизительного

состояния природных сред. Некоторые из относительно важных типов почвы, указанных на рисунке, будут дополнительно обсуждаться в других главах.



Рисунок 1.4. Примерное положение некоторых природных сред, характеризующихся значениями E_h и pH (По материалам: Garrels, R. M. and Christ, C. L. [1965], *Solutions, Minerals and Equilibria*, Harper & Row, New York).

1.5. ИСКУССТВЕННАЯ СРЕДА

1.5.1. Общее обсуждение

Искусственная среда охватывает много составляющих, как указано в таблице 1.1. Нынешние исследования в области захоронения отходов, в том числе опасных и токсичных, показаны в таблице 1.2. Конечно, всё это срочно необходимо исследовать. В дополнение к свалкам и опасным отходам мы акцентируем внимание на кислотных дождях, кислотном дренаже, загрязненных нефтью почвах и резиновых отходах шин, так как этим проблемам ученые, занимающиеся геотехнологией, уделяют очень мало внимания. Другие важные экологические

геотехнические проблемы связаны с засушливыми землями и пустынями. В этой главе также будут обсуждаться проблемы, связанные с эрозией, оседанием и оползнями, вызванными как антропогенными, так и естественными причинами. Некоторые особенности этих проблем будут рассмотрены в следующих разделах.

1.5.2. Твердые и жидкие отходы

Отходы могут быть сгруппированы в твердые и жидкие формы. Большая часть твердых отходов – городские отходы. Этот мусор со временем разлагается и образует газы и жидкие отходы, обычно называемые фильтратом. Согласно отчету Агентства по охране окружающей среды США (EPA), около 90 % отходов, включая опасные промышленные отходы, находятся в жидкой форме. Поэтому контроль над твердыми и жидкими отходами требует особого внимания.

Понимание взаимодействия между поровыми флюидами и глиной требует знания экологических аспектов геотехнической инженерии. Это важно для инженерного использования природных материалов для локализации опасных и токсичных отходов. Без этих знаний о поведении глины в результате действия на нее опасных отходов не может быть надежной основы для прогнозирования долгосрочного развития всей системы.

Таблица 1.2. Современные направления исследований в области экологической геотехнологии

Категория	Исследовательские достижения (%)
Полигон	35
Опасные токсичные отходы	16
Шлам	14
Ядерные отходы	12
Загрязнение океана	9
Повторное использование отходов	8
Водно-болотных угодья	4
Кислотный дождь, радоновый газ, кислотная	> 2

Источник: по Fang, H. Y. (1992a), Proc. Mediterranean Conf. on Environmental Geotechnology, M. A. Usmen and Y. B. Acar, eds., Balkema, Rotterdam, pp. 11–19.

Таблица 1.3. Средний состав твердых отходов (мусора)

	Нью-Йорк (1968)	США, национальный	Осака, Япония
Бумага	58,8	51,6	37,1
Пищевые отходы	9,2	19,3	13,2
Металл	7,6	10,2	5,5
Стекло	8,6	9,9	12,3
Древесина	2,5	3,0	2,5
Текстиль	0,8	2,7	4,0
Резина, кожа	0,8	1,9	0,3
Пластик	0,8	1,4	15,2
Садовые отходы	10,1	–	2,5

1.5.3. Неорганические отходы (городской мусор)

Материал отходов состоит из чего-либо, что не может быть дополнительно использовано или переработано экономически; таким образом, его состав варьируется от населения к населению, от страны к стране, а также от сезона к сезону. Плотность варьируется от 50 до 400 pcf в зависимости от количества металла и мусора (Sowers, 1968 и Sarsby, 1995). В таблице 1.3 приведен средний состав твердых отходов на основе результатов национального обследования США и отчетов из города Нью-Йорк, а также из Осаки, Япония (Yamamura, 1983). Обычно материал отходов подлежит захоронению, но в некоторых странах он используется для строительных блоков. Тем не менее из-за психологических аспектов, связанных с использованием отходов, этот подход распространен нешироко. Наиболее экономичным способом утилизации отходов в настоящее время является захоронение на полигоне.

1.5.4. Отходы резиновых шин

Отработанные резиновые шины являются основной частью твердых отходов. EPA указывает, что производство резиновых шин для автомобилей увеличилось на 42 % с 1960 по 1988 год. В настоящее время в одних только США ежегодно выбрасывается около 280 миллионов отработанных шин. Из этого количества только небольшое количество шин извлекается для целей переработки (5,6 % было восстановлено в 1988 году). Большая часть отработанных шин сбрасывается на свалку. Сваи утильных шин растут каждый год и представляют две основные угрозы для населения: опасность пожара и опасность для здоровья. Inyang и Bergeson (1992) и Collins и Ciesrelski сообщают о состоянии отходов при строительстве шоссе. Также сообщается об использовании отходов резиновых шин в качестве дорожных материалов и для других применений. Дальнейшие обсуждения технического применения утильных резиновых шин будут представлены в разделе 17.10.

1.5.5. Загрязненная нефтью почва

Разлив нефти в большинстве случаев является случайным – при транспортировке по суше или по морю, утечка из резервуаров или утечка во время процесса бурения. Однако бывают случаи, когда нефть разливалась преднамеренно, как во время войны в Персидском заливе в 1991 году. Самая тяжелая катастрофа с танкерами в Северной Америке произошла в 1989 году, когда затонул супертанкер Exxon Valdez, пролив 11 миллионов галлонов нефти. Худший разлив нефти в Европе произошел в марте 1978 года у северо-западного побережья Франции, когда танкер Amoco Cadiz потерял 68 миллионов галлонов сырой нефти. Серьезным разливом нефти в Британии стал танкер Torgue Canyon, который сел на мель в 1967 году, доставив 40 миллионов галлонов нефти в Атлантику, которая достигла пляжей и береговых линий в Корнуолле и юго-западной Англии. Совсем недавно, в 1993 году, танкер разлил 26 миллионов галлонов сырой нефти между Шетландскими островами в Северном море, недалеко от Шотландии, после потери мощности и из-за ураганных ветров и морей. Крупнейший разлив из нефтеналивного танкера произошел в 1979 году у

Тринидада и Тобаго, когда столкнулись два корабля, пролив 97 миллионов галлонов нефти.

Согласно отчету EPA за 1979 год, ежегодно более 10 миллионов галлонов нефти попадает в водоемы США в результате более 10 000 разливов. В США имеется несколько миллионов подземных резервуаров различных размеров, содержащих нефтепродукты. По оценкам, до 25 % этих резервуаров подтекают, из-за чего нефтяные жидкости попадают в землю. Поправки к CERCLA (Закон о комплексном реагировании на проблемы окружающей среды, компенсации и ответственность) 1986 года свидетельствуют о повышенном внимании к этой проблеме. Утечка нефтяных углеводородов в грунт представляет значительную потенциальную опасность для населения и окружающей среды. Это может быть источником загрязнения сточных вод и запасов подземных вод, а также причиной возможных неблагоприятных воздействий на растения, рыбу и дикую природу.

При разливе или утечке масла почвы вокруг источника утечки загрязняются. Некоторые основные задачи должны быть выполнены для восстановления загрязненной территории. Удаление загрязненной почвы является важной частью общей обработки. Однако ограничения в местах захоронения и приемных свалках усложняют эту проблему. Поэтому появляются новые технологии очистки на месте, такие как электрокинетическое и электромагнитное (разделы 9.10 и 9.13) удаление или биодegradация (Norris и соавторы, 1994). Однако они либо находятся на экспериментальной стадии, либо могут потребовать длительного времени для получения результатов. Экономичное и выгодное решение, по-видимому, состоит в стабилизации выкопанной загрязненной почвы и в превращении ее полезный материал для строительства (раздел 17.8).

1.6. Кислотный дождь и кислотный дренаж

1.6.1. Кислотный дождь (кислотное осаждение)

Среди всех типов загрязнителей, перечисленных в таблице 1.1, кислотные дожди являются наиболее распространенными и охватывают большую площадь, чем любые другие, но этому вопросу уделяется очень мало внимания; поэтому мы остановимся на этом подробно.

Кислотный дождь – одна из основных техногенных экологических проблем. Он может вызвать все фазы загрязнения воздуха, воды и почвы. Кислотные дожди возникают в результате выбросов в воздух различных загрязняющих веществ, основными источниками которых являются электростанции, работающие на ископаемом топливе, выхлопные газы автомобилей и промышленные объекты. Эти выбросы содержат диоксид серы (SO_2), оксид азота (NO) и другие газы. Газы соединяются с кислородом (O) и водяным паром (H_2O) в воздухе, образуя серную кислоту (H_2SO_4), азотную кислоту (HNO_3), соляную кислоту (HCl) и другие кислоты и соединения.

Есть две основные формы осаждения, когда эти кислоты падают на землю; и в дополнение к содержанию кислоты, кислотный дождь также имеет две уникальные характеристики, которые вызывают больше осложнений.

1. Кислотный дождь не имеет границ. Поскольку кислоты находятся высоко над землей, они могут переноситься ветром за сотни миль, прежде чем упадут или исчезнут из воздуха.

2. Составы кислотных дождей распределены неравномерно.

Поскольку основным источником кислотных дождей являются электростанции, работающие на ископаемом топливе, 44 % всех оксидов S и N, производимых в США, поступают из пяти штатов, из-за горящего угля в долинах рек Огайо, Миссури и Теннесси. Ветер переносит газы в северо-восточном направлении – в направлении штатов Новой Англии, среднеатлантических штатов и Канады (DER, 1990). На рисунке 1.5 показано распределение кислотных дождей в восточной части США. С 1955 года по настоящее время наблюдается их значительное увеличение. Исследования кислотных дождей в Европе также показали растущую тенденцию к повышению кислотности со значениями pH, варьирующимися от 2 до 5. Отчеты из Китая в 1983 году указывают, что в их юго-западном регионе pH дождевой воды упал до 2,7.

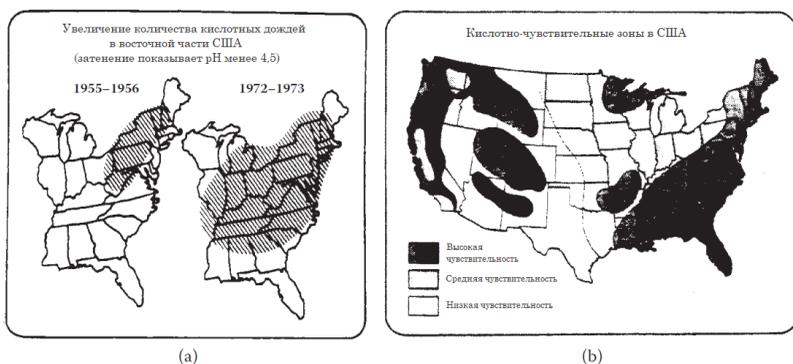


Рисунок 1.5. Кислотные дожди и распределение чувствительных к кислоте районов в США: а) кислотные дожди (1955–1973 гг.); б) чувствительные к кислоте районы (данные USEPA [1997], Compliance Report, Acid Rain Program, United States Environmental Protection Agency, EPA-430-R-97-025, Washington, D.C.).

Кислотный дождь убивает водную жизнь, подкисляя воду и отравляя растения и животных минералами, которые он вымыл из почвы. Кроме того, он наносит вред деревьям и посевам, сжигая их листву и отводя их энергию от роста к восстановлению. О потере питательных веществ в почве из-за кислотности осадков пишет Reuss (1978). В 1991 году общенациональное исследование тысяч озер и ручьев показало, что 75 % кислых озер и 47 % ручьев вызваны кислотными дождями. В этой работе использовались данные исследования, проведенного EPA для 1180 озер и 4670 водотоков.

Кислотные дожди вызывают проблемы практически во всех сферах окружающей среды (Gunnerson и Willard, 1979), которые связаны с междисциплинарным изучением атмосферы, биосферы, гидросферы и литосферы. Тем не менее, с точки зрения инженерно-геологической инженерии, текущее исследование по этому аспекту сосредоточено на том, как кислоты влияют на изменение объема, поведение при растрескивании, зависимость напряжения от деформации и гидравлическую проводимость грунта в зависимости от

характеристик компонентов дорожного покрытия и фундамента дорожных сооружений, которые влияют на инфраструктуру жизненного цикла почвенно-дорожных систем.

1.6.2. Шахтный кислотный дренаж

Кислотный дренаж также охватывает большие территории (Piwowar и Work, 1997). Эта проблема заключается в стоке воды из старых заброшенных угольных шахт. Сульфиды железа (FeS_2) или пириты в шахтах окисляются до серной кислоты (H_2SO_4). Затем серная кислота растворяется в воде и стекает через шахты. Когда эта кислая вода попадает в ручьи, озера или грунтовые воды, это приводит к загрязнению. В 1969 году было зарегистрировано загрязнение дренажных шахт примерно 20 000 км водных путей в США, в основном в Пенсильвании, Западной Вирджинии и Кентукки.

Кислая шахтная вода представляет собой химически сложную жидкость, не имеющую определенной количественной связи между ее составляющими. Она транспортирует и осаждает в основном неорганические материалы в виде твердых веществ, в растворе или в суспензии. Миллионы галлонов кислых дренажных шахт текут в ручьи и реки Пенсильвании каждый год. Эта кислая шахтная вода варьируется от почти щелочной до сильно кислой. Мелкие частицы нерастворимых твердых веществ в шахтной воде транспортируются водой через шахту и выходят вместе с потоком сточных вод. Более крупные частицы оседают с уменьшением скорости потока; более мелкие частицы остаются в суспензии в течение значительного периода времени или могут мигрировать в отложения насыпей, земляных дамб или скважин.

1.7. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Как обсуждалось в разделе 1.2 и на рисунке 1.3, экологическая геотехнология требует знаний из других дисциплин, чтобы понять реакцию почвы на окружающую среду. Кроме того, другие дисциплины нуждаются в наших знаниях, чтобы помочь в решении их проблем. Отдельные области были в некоторой степени оценены и получили помощь от геотехнических групп, а некоторые представляют меньший интерес. В следующих разделах кратко обсуждаются такие области.

1.7.1. Свободные земли и пустыни

Согласно докладу Организации Объединенных Наций в 1983 году и другим исследованиям (например, Zhu, 1987), ухудшение продуктивных земель в пустынных условиях продолжается без потерь со скоростью 14,8 млн. акров в год. Опустынивание в настоящее время затрагивает около 100 стран. Распространение пустынь угрожает 35 % поверхности земли – или около 45 миллионов квадратных миль – и 20 % ее населения (около 850 миллионов человек); 75 % этой области и 60 % населения уже затронуты. По оценкам мировых продовольственных и сельскохозяйственных организаций, ежегодные потери производства продуктов питания, вызванные опустыниванием, составляют 26 миллиардов долларов. По оценкам Организации Объединенных Наций, из-за нынешнего опустынивания

один миллиард человек в мире уже недоедает, а многие умирают от голода во многих развивающихся странах.

1.7.2. Краевые земли (болотистая местность)

Использование маргинальных земель для градостроительства оказывает наиболее значительное влияние на социально-экономические и экологические программы, о чем свидетельствуют многие тематические исследования. Эти тематические исследования охватывают Нижний Манхэттен и Нью-Йоркский музей современного искусства. Кроме того, 20 000 акров внутренних болот в Нью-Джерси были преобразованы в крупные торговые центры с многоэтажными магазинами и парковочными гаражами.

Использование водно-болотных угодий для различных инженерных целей может создать дополнительные полезные земли; однако при этом есть много вредных эффектов. Например, строительство дорог на заболоченных территориях может привести к различным экологическим последствиям. Результаты исследований, сообщенные Shuldiner и соавторами (1978), указали, что экологическое воздействие засыпки грунта на водно-болотные угодья включают:

- 1) подавление ливневых вод и распределение приливов;
- 2) увеличение мутности воды;
- 3) изменение режимов циркуляции воды;
- 4) удаление естественных систем фильтрации;
- 5) введение экзотических;
- 6) затруднение передвижения животных;
- 7) изменение биологической продуктивности;
- 8) изменение потока питательных веществ.

Определение влияния заливки грунта на шоссе или других сооружений на экологическое поле конкретного водно-болотного угодья или проблемные почвенные отложения является сложной проблемой. Тем не менее эти соображения могут быть использованы в качестве руководства при принятии решения о местоположении шоссе и их проектировании, когда речь идет о водно-болотных угодьях и поймах. Некоторые из этих проблем будут более подробно рассмотрены в главе 14.

1.7.3. Прибрежные поля

В 1992 году программа исследования экосистем на окраинах суши (LMER) (раздел 14.2) показала, что деятельность человека привела ко многим изменениям в прибрежной среде, таким как:

- 1) утрата среды обитания диких животных; среди многих примеров – потеря 50 % прибрежных водно-болотных угодий штата Коннектикут;
- 2) перехват воды и отложений; гидротехнические сооружения для ирригации, защиты от штормов и электроэнергии сократили площадь водно-болотных угодий на многих побережьях и изменили расположение каналов в дельтах Миссисипи;
- 3) увеличение загрязнения прибрежной среды: промышленные и сельскохозяйственные химикаты;
- 4) увеличение скорости повышения уровня моря: парниковый эффект и повышение уровня моря (раздел 14.7).

1.7.4. Эрозия почвы

Эрозия почвы вызвана воздействием ветра, осадков или волн (пляжная эрозия) на поверхность голой или незащищенной поверхности почвы. Это включает в себя прогресс отрыва частиц почвы и их перенос. Отложения, которые могут образовываться в результате эрозии, ограничивают эффективность дренажных и ирригационных канав, заливок и резервуаров; загрязняют поверхностные воды; наносят ущерб сельскохозяйственным угодьям, домам, дорогам и мостам и нарушают естественную экологию и окружающую среду. По оценкам Министерства сельского хозяйства США, общая стоимость удаления наносов и дноуглубительных работ в результате эрозии почвы в 1980 году составляла приблизительно 500 миллионов долларов. Ежегодно для удаления осадков из ирригационных каналов требуется приблизительно 16 миллионов долларов. Эти цифры не учитывают ущерб сельскохозяйственным угодьям, домам, дорогам, мостам и зонам отдыха в результате потери почвы.

1.8. ПРОЦЕССЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОЧВЫ И ЗАГРЯЗНИТЕЛЯ

1.8.1. Общее обсуждение

Все виды загрязнения оказывают прямое или косвенное влияние на свойства грунта. Например, дождь, падающий на мусорную свалку, загрязнит как поверхностные, так и подземные водные системы. Загрязненная вода будет воздействовать на различные сооружения, такие как фундаменты, кессоны, сваи и шпунт. Если загрязненная вода используется для смешивания бетона, это повлияет на обрабатываемость и долговечность бетона. При строительстве насыпи также будет зависеть соотношение влажности и плотности почвы. С другой стороны, испарение из поверхностных вод и суммарное испарение с поверхности земли проникают и в биосферу, и в атмосферу. Перколяция дождевой воды в грунтовую почву из-за сорбированных ионов и процессов сорбции приведет к тому, что некоторое количество почвенного раствора попадет в дренажные системы или испарится в воздухе. На рисунке 1.6 представлено влияние загрязнения воздух–вода–земля на Техническое поведение строительных материалов.

Циклы загрязнения не изолированы, а тесно связаны. Проблемы загрязнения не могут быть решены без учета всех взаимосвязанных аспектов. К сожалению, в настоящее время акцент делается на загрязнение воды и воздуха, при этом очень мало внимания уделяется загрязнению почвы. Обследование различных исследовательских мероприятий по загрязнению показало следующее распределение исследовательских усилий, отраженное в финансировании: загрязнение воздуха (42 %), загрязнение воды (51 %) и загрязнение почвы (7 %) (Fang, 1989a). Решение трех проблем должно происходить одновременно, и все они должны быть одинаково исследуемы.

1.8.2. Источники или пути загрязнения земли

Источники загрязнения грунта можно разделить на три основных маршрута: (1) точка, (2) линия и (3) поверхностные источники. Каждый источник может быть далее разделен на неподвижные и подвижные точки; К фиксированным точкам относятся свалка, склад и промышленные площадки, а также шахтные

полосы, а подвижные точки источников загрязнения включают утечку опасных материалов (TRB, 1986), таких как разливы нефти при транспортировке как на суше, так и на море. На рисунке 1.7 представлена классификация источников загрязнения почвы. Следует отметить, что некоторые загрязнения являются непрогнозируемыми, например разливы нефти во время войны в Персидском заливе в 1991 году.

Рисунок 1.6. Влияние загрязнения воздуха, воды и грунта на техническое поведение строительных материалов.

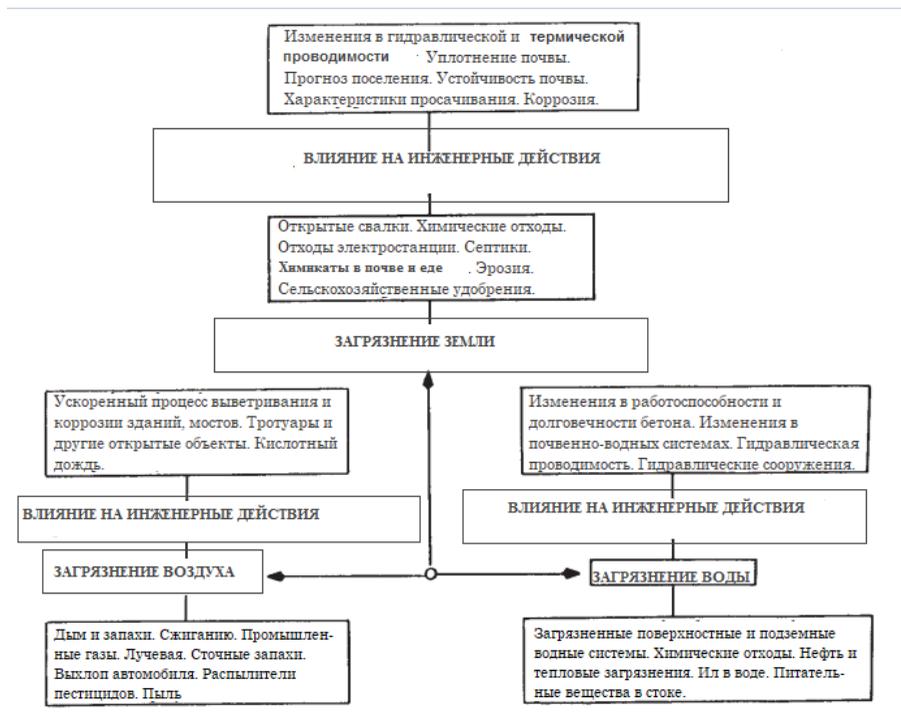




Рисунок 1.7. Источники и пути загрязнения почвы (По материалам: Wang, С. Н. [1985], Water Pollution, Scientific Publ., Beijing, 267 p. [На китайском]).

1.8.3. Механизмы загрязнения

Независимо от источников существует три основных механизма загрязнения почвы.

1. Загрязнение может происходить от дождевых осадков, таких как кислотные дожди или дожди, попадающие на санитарную свалку, или от попадания масла или химических отходов на землю.

2. Загрязняющие вещества попадают в виде утечек в результате захоронения в скважинах или строительства объектов для захоронения отходов, таких как свалки, септики, боковые отстойники и лагуны.

3. Гидравлические или химические изменения позволяют загрязняющим веществам перемещаться внутри или между слоями почвы. В этой категории явления охватывают химический, физико-химический и микробиологический аспекты.

Категории 1 и 2 являются прямыми процессами. Категория 3 охватывает процесс физико-химического разложения, химические изменения и бактериальную атаку, выщелачивание и ионообменную реакцию. Эти процессы будут обсуждаться в различных главах.

1.9. ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ЭНЕРГЕТИКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКИМ ЦИКЛОМ БЕДСТВИЯ

1.9.1. Общее обсуждение

Окружающая среда является основным контролирующим фактором в балансе цикла энергия–среда–бедствие. Для более крупных строительных проектов экологические соображения потенциально играют более важную роль, чем сам инженерный проект. Например, недавние крупные инженерные проекты в Китае, такие как железная дорога и автомагистрали Тибета, включали проблемы, связанные как с замерзанием–оттаиванием, так и с вечной мерзлотой (Wu и Qian, 2003). Эти аспекты проекта обсуждаются в главе 8. Кроме того, в настоящее время планируется проект пересечения туннельного проекта Тайваньского пролива в сочетании со сложными экологическими проблемами, связанными с высокоскоростным железнодорожным сообщением.

1.9.2. Экологические геотехнические проблемы

Используем проект туннеля Тайваньского пролива в качестве примера для иллюстрации потенциальных осложнений, возникающих в результате экологических проблем, связанных с прибрежными водно-болотными угодьями и устьями рек. Эти экологические проблемы возникают в основном из-за следующего.

1. На предлагаемых маршрутах вдоль участка туннелирования глубина морской воды составляет 40–60 м; у береговой линии глубина всего около 3–4 м.

2. В проливе морское дно покрыто мягкими морскими отложениями толщиной около 4–6 м.

3. Движение океанических течений в проливном регионе, как правило, медленное, а направление течения – нерегулярное.

В этих условиях окружающей среды строительство должно быть очень тщательно изучено, и должны быть приняты все меры предосторожности во избежание непредвиденной экологической катастрофы. Для дальнейшего изучения проекта Тайваньского пролива см.: Fang и соавторы (2003).

1.10. МЕТОДЫ АНАЛИЗА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

1.10.1. Общее обсуждение

Исходя из предыдущего обсуждения, становится ясно, что инженер-геотехник несет ответственность за решение этой крайне междисциплинарной проблемы, и, с другой стороны, эта задача связана со сложными проблемами. Экологическая геотехнология требует знаний из других дисциплин, чтобы понять реакцию почвы на окружающую среду как для краткосрочных, так и для долгосрочных проблем. Чтобы это сделать, инженеры-геотехники должны понять следующие факторы.

1. Большинство геотехнических проектов происходят в природе и, следовательно, должны рассматриваться как долговременные установки и строиться на открытом воздухе, где они будут подвержены различным воздействиям окружающей среды.

2. Почва более чувствительна к воздействию окружающей среды, чем любой другой материал. Нагрузка может сильно повлиять на свойства почвы, но это не единственный параметр, который следует учитывать. Также должны учитываться другие переменные, вызванные факторами окружающей среды, такими как тепло, влажность и проникновение загрязнений.

В тексте и на рисунке 1.3 показано, что взаимодействие почвы с окружающей средой является сложным явлением, и современные подходы, основанные только на нагрузке, не могут эффективно оценить вовлеченные явления. Поэтому срочно требуются дополнительные модификации или дополнительная информация. Для преодоления этих недостатков в современных представлениях необходима информация о термоэлектрических и магнитных физико-химических эффектах. Если мы не будем учитывать эти факторы, будет больше «геотехнических сюрпризов».

1.10.2. Обзор современных концепций механики грунтов

С 1925 года, когда Карл Терцаги представил концепцию механики грунтов в области гражданского строительства, сделав ее основным предметом в учебных программах, были созданы основные концепции и теории, которые значительно улучшают современные технологии проектирования и строительства в гражданском строительстве. Однако большая часть усилий основана на физико-механическом поведении почвы. В некоторых институтах геотехнический курс становится частью курсов инженерной механики, игнорируя тем самым фундаментальное поведение самой почвы.

Поскольку почва очень чувствительна к местным условиям окружающей среды, ее нельзя оценить одним механическим способом. Текущая инструкция по геотехнологии была разделена следующим образом: механическая нагрузка (65 %), геологическая (16), минералогическая (9 %), физико-химическая (7 %), биологическая (> 2 %) и бактериологическая (< 1 %). Кроме того, исследования были также направлены на области, имеющие отношение к краткосрочным эффектам, поскольку краткосрочные эффекты составляют 81 %, в то время как долгосрочные – 5 %, а промежуточные – 14 % (Fang, 1995b). При изучении этой информации становится очевидным, что большая часть усилий сосредоточена на комбинации механических (нагрузочных) и краткосрочных исследований. Очень мало усилий делается для изучения воздействия на окружающую среду, особенно физико-химико-биологического воздействия на почву.

Кроме того, в настоящее время проектирование и строительство большинства геотехнических проектов основаны на результатах испытаний в соответствии со стандартами Американского общества по испытаниям материалов (ASTM) и Американской ассоциации государственных служащих автомобильных дорог и транспортных служб (AASHTO). Эти стандарты основаны на контролируемых

условиях при комнатной температуре с использованием дистиллированной воды в качестве поровой жидкости. Кроме того, большинство геотехнических анализов концентрируются на условиях нагрузки, испытанных в течение небольшого времени, но прогнозируемых в долгосрочной перспективе. Поскольку полевые ситуации и стандартные условия управления значительно отличаются, часто возникают преждевременные или прогрессирующие отказы. Эти концепции и методы, используемые в настоящее время, изложены следующим образом.

1. Параметры почвы, такие как удельный вес (ASTM D854) и пределы Аттерберга (ASTM D423; D424) для данной почвы при любых условиях окружающей среды, считаются постоянными.

2. Обычно используемыми параметрами являются коэффициент пустотности или пористость в качестве индикаторов деформации почвы под нагрузкой.

3. Содержание воды в почвенной массе в основном зависит только от силы тяжести, и другие типы воды в поровом пространстве, такие как вода из окружающей среды (разделы 4.9 и 5.2), не включены.

4. Поток через почвенную массу учитывает только гидростатический потенциал. Другие причины, такие как тепловые, электрические, магнитные и химические, обычно не учитываются при анализе и проектировании.

5. Конституционные модели, основанные на соотношении напряжение–деформация почвы, принимаются произвольно. В некоторых случаях предположение может зависеть от предпочтений человека, а не от поведения почвы.

1.10.3. Предлагаемые подходы или методы оценки поведения почвы

1.10.3.1. Общее обсуждение

В настоящее время предмет геотехнологии стоит на распутье. Один путь все еще следует классическим механистическим концепциям, разработанным первоначально Терцаги. К сожалению, механистический подход не может эффективно объяснить все явления почва–вода–среда и взаимодействие почва–структура в современном мире. Другой путь обращается к экологическим ситуациям, которые бросили вызов этим концепциям, и предоставляет методы для анализа поведения почвы в различных условиях окружающей среды. Концепции и методы анализа поведения почвы в различных условиях окружающей среды, потому что они не могут эффективно объяснить все явления в системе почва – вода – окружающая среда и взаимодействие почва–структура в современном мире. Ситуация не может быть изменена или исправлена резко за одну ночь, но она должна измениться в конечном счете без большого разрыва между этими двумя направлениями. Чтобы справиться с этой проблемой, представлен комбинированный подход, именно поэтому теория частиц энергии поля представлена в этом учебнике. Другими словами, этот новый учебник представлен со старой структурой, но новой информацией, добавленной в него по мере необходимости.

1.10.3.2. Инструкция

Методы оценки поведения почвы в различных условиях окружающей среды обсуждались в предыдущих разделах. Чтобы лучше понять взаимодействие почвы, воды и окружающей среды, студентам рекомендуется пройти такие курсы, как почвоведение, физикохимия, минералогия, геология и микробиология.

1.10.3.3. Лабораторные испытания

В таблице 1.4 представлено сравнение контрольных параметров для классификации почв. В настоящее время системы классификаций почв, такие как унифицированная (ASTM D2487) и AASHTO (M145), основаны на размере частиц и консистенции почв. Поскольку почва чувствительна к местной среде, необходимо оценить некоторые дополнительные параметры, такие как удельная поверхность, pH в поровой жидкости, адсорбция и диэлектрическая проницаемость. Загрязненная почва может быть идентифицирована по признакам растрескивания поверхности, цвету, запаху и изменениям объема (см. таблицу 1.5). Эти характеристики также должны быть изучены и рассмотрены. Идентификация и характеристика загрязненной почвы будут представлены в разделе 3.8.

Таблица 1.4. Сравнение контрольных параметров для классификации почв

Существующие контрольные параметры ¹ (факторы окружающей среды не учитываются)	Предлагаемые контрольные параметры (учитываются факторы окружающей среды)
Распределение зерен по размерам (ASTM D422)	Процент, проходящий через сито # 200 (ASTM D1450)
Консистенция почвы (содержание влаги)	Удельная поверхность
Предел жидкости (ASTM D423)	pH в поровой жидкости
Пластиковый предел (ASTM D424)	Ионообменная емкость
Индекс пластичности (ASTM D424)	Адсорбция и десорбция. Диэлектрическая постоянная

¹Единая система классификации почв (ASTM D2487)

Таблица 1.5. Блок-схема для характеристики и идентификации загрязненного грунта для технических целей



1.10.3.4. Интерпретация и анализ данных

Для интерпретации различных взаимодействий в системе почва–вода–окружающая среда предложена теория частиц энергии поля, как показано на рисунке 1.3. Подробные концепции будут представлены в главе 2, и их применение будет обсуждаться в различных главах по всей книге.

1.11. ОБЪЕМ И ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕКСТА

Основная цель этого текста – обобщение основных понятий, методов испытаний и анализа почвы, связанных с экологическими аспектами геотехнологии. Систематическая корреляция экспериментальных данных с теоретическим объяснением считается предпосылкой для всестороннего анализа воздействия фактора окружающей среды на почву или горную породу для практического применения систем грунт–фундамент–структура в окружающей среде. Текст содержит 18 глав и может быть разбит на три части.

1. Основные понятия экологической геотехнологии, которые включают фундаментальные теоретические соображения.

2. Важность воздействия окружающей среды на почву или горную породу; основные параметры почвы иллюстрируются с помощью экспериментов с уплотнением и проницаемостью.

3. Различные аспекты геотехнических проблем окружающей среды иллюстрируются на примерах оползней, оседания грунта, эрозии, средств контроля отходов и методов укрепления грунта.

Численные примеры и проблемы также приведены в каждой главе. Цель этого учебника состоит в том, чтобы обучать студентов инженерных специальностей и служить в качестве справочника. Таблица 1.4 суммирует различные тесты для

получения экологических геотехнических свойств почв и потенциальных применений.

1.12. РЕЗЮМЕ

1. Проблемы загрязнения почвы ставят под вопрос современные концепции и методы механики почвы для эффективного анализа поведения почвы в различных условиях окружающей среды; следовательно, экологические аспекты геотехнологии были расширены, чтобы охватить проблемы почвы и горных пород и их взаимодействие с различными экологическими циклами и сферами, включая атмосферу, биосферу, гидросферу и литосферу, а также геомикробиосферу.

2. Важность экологических циклов, связанных с различными геотехническими проблемами, а также необходимые знания из других дисциплин, отражена в таблице 1.1.

3. В тексте предлагается новая концепция под названием «теория поля энергии частиц» с целью объяснения различных типов поведения почвы в различных условиях окружающей среды. Детали концепции будут представлены в главе 2. Все объяснения касательно концепцией будут даны по всему тексту.

4. Описаны и обсуждены как природные, так и антропогенные загрязнения.

5. Обсуждаются механизмы процесса загрязнения и взаимодействия почвы с загрязнителями, включая источники и пути загрязнения почвы.

6. Представлена блок-схема для характеристики и идентификации загрязненного грунта для инженерных целей.

7. В общих чертах обрисованы тематика и структура текста.

ПРОБЛЕМАТИКА

1.1. Прокомментируйте современные концепции и подходы механики почв, связанные с проблемами их загрязнения.

1.2. Почему воздействие механической энергии считается краткосрочным процессом и почему химические, физико-химические и геомикробиологические процессы являются долгосрочными?

1.3. Определите термин «биосфера» и то, как биосфера связана с экологической геотехнологией.

1.4 Почему некоторые почвы более чувствительны к окружающей среде, чем другие?

1.5 Как различают токсичные отходы и опасные отходы?

1.6. Объясните, почему и как разливы нефти наносят значительный ущерб окружающей среде на побережье.

1.7. Объясните механизм процесса загрязнения в почвенно-водной системе.

1.8 Каковы основные источники загрязнения почвы?

1.9. Объясните, почему загрязнение почвы и системы воздух–вода–грунт взаимосвязано.

1.10. Почему загрязнение воздуха и воды влияет на геотехническое поведение грунта?

1.11 Что такое кислотный дождь? Как кислотные дожди влияют на стальные и бетонные конструкции?

1.12 Как кислотная вода влияет на бетонные смеси?

2. Теория энергетического поля частиц и ее приложение

2.1. ВВЕДЕНИЕ

Как сказано в главе 1 и показано на рисунке 1.3, экологическая геотехнология является междисциплинарной наукой, требующей знаний из других областей. Современные знания о концепциях и методах геотехнической инженерии не позволяют эффективно анализировать поведение почвы в различных условиях окружающей среды; поэтому теория, называемая «энергетическим полем частиц», была введена в качестве единого подхода для анализа поведения почвы в различных условиях окружающей среды (Fang, 1989a и 1991a). Краткий обзор фундаментальной концепции и ее приложений к экологической геотехнологии представлен далее.

2.2. ТЕОРИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЧАСТИЦ

2.2.1. Основы

Теория энергетического поля частиц описывает три основных компонента:

- элементарные частицы;
- системы частиц;
- энергетические поля.

Объединение этих трех компонентов в одну систему называется энергетическим полем частиц. По существу, данная теория, с одной стороны, объединяет понятия механики и физики твердого тела и, с другой стороны, физико-химические понятия, а также понятия органической химии и биологии. Взаимодействие между этими двумя группами является общим знаменателем, известным как частица. Частицы являются основными строительными единицами всех типов материалов, включая почву, воду, газ (воздух) и загрязняющие вещества. Кроме того, в эту теорию включены некоторые явления окружающей среды, такие как ионообменная реакция, адсорбция, окислительно-восстановительная реакция и взаимодействие почвы с бактериями, которые создают трудности в современном геотехническом подходе. Теория основана на следующих предположениях.

2.2.2. Гипотезы

1. Физический мир состоит из элементарных частиц, таких как атомы, ионы и молекулы.
2. Эти элементарные частицы могут притягивать или отталкивать друг друга.
3. Энергии связи, такие как ионная, ковалентная и химическая, и связи, такие как катионная, дипольная и диполь-катионная, определяют прочность и долговечность связей между частицами.

4. Относительное движение частиц обусловлено этими энергиями.

5. Системы частиц могут быть:

- в твердом состоянии, если притяжение (A) \gg отталкивание (R);
- в жидком состоянии, если притяжение (A) \approx отталкивание (R);
- в газообразном состоянии, если притяжение (A) \ll отталкивание (R).

2.2.3. Элементарные частицы

Элементы состоят из крошечных фундаментальных частиц материи, называемых атомами. Обычные атомы являются нейтральными, то есть они не несут электрический заряд. Однако при определенных обстоятельствах атомы могут стать электрически заряженными. Такие заряженные атомы называются ионами. Некоторые элементы образуют положительные ионы, называемые катионами, а некоторые образуют отрицательные ионы, называемые анионами.

Атом как основная частица вещества состоит из еще более мелких частиц, называемых субатомными частицами. Нейтрон, электрон и протон классифицируются как субатомные частицы. Положительная субатомная частица, присутствующая в атоме, называется протоном. Единицы отрицательных зарядов известны как электроны. Третья субатомная частица, найденная как составляющая атома, которая не несет электрического заряда (нейтральная), известна как нейтрон.

Совместное использование пары электронов связывает атомы вместе, образуя частицы нового типа, называемые молекулами. Молекулы являются стабильными частицами и характерными химическими частицами многих соединений. Сводка основных типов частиц, которые служат строительными единицами материи, представлена в таблице 2.1.

В дополнение к основным частицам, указанным в таблице 2.1, необходимо отметить, что были обнаружены новые частицы. Все эти частицы имеют общее название – гидроны. Гидроны можно подразделить на барионы и мезоны. Под барионами находятся протоны и нейтроны. Протоны состоят из двух кварков и глюонов, которые опосредуют силы, связывающие их вместе. Кварки являются единственными элементарными частицами в стандартной модели физики, которые испытывают все четыре фундаментальных взаимодействия (то есть фундаментальные силы): электромагнетизм, гравитацию, сильное взаимодействие и слабое взаимодействие. Существует шесть типов кварков, известных как ароматы: вверх, вниз, странный, шарм, верхушка и дно. Под физикой элементарных частиц принято понимать теорию, касающуюся электромагнитных, слабых и сильных ядерных взаимодействий, а также классификацию всех известных субатомных частиц.

Таблица 2.1. Основные типы частиц, которые служат строительным элементом материи

Субатомные частицы		
Наименование частиц	Электрический заряд	Масса
Электрон	Отрицательный заряд (-)	1/1837 (атома Н)
Протон	Положительный заряд	1 (атома Н)
Нейтрон	Нейтральный (0)	1 (атома Н)
Атомы, молекулы и ионы		
Наименование частиц	Электрический заряд	Примеры
Атомы	Нейтральный	Натрий (Na), магний (Mg), углерод (C), азот (N), кислород (O), водород (H)
Молекулы	Нейтральный	Метан (CH ₄), аммиак (NH ₃), хлористый водород (HCl)
Группа ковалентно связанных атомов		
Ионы (простые)	Заряженные частицы	
Заряженные атомы		
Анион	Положительный заряд (+)	Ион натрия (Na ⁺), ион магния (Mg ²⁺), оксидный ион (O ²⁻), хлорид-ион (Cl ⁻)
Катион	Отрицательный заряд (-)	
Многоатомные ионы	Заряженные частицы	Карбонат-ион (CO ₃ ²⁻), нитрат-ион (NO ₃ ⁻), гидроксид-ион (OH ⁻)
Группы ковалентно связанных атомов, несущих заряды		

Источник: данные взяты из: Dickson, T. R. (1974), *Understanding Chemistry: From Atoms to Attitudes*, John Wiley & Sons, New York; и другие.

С момента зарождения Вселенной вскоре после Большого взрыва в природе выжили только кварки вверх и вниз, а протоны и нейтроны, составляющие ядра всех атомов, построены из комбинаций этих двух кварков. Другие кварки исчезли из наблюдаемой вселенной, но были воссозданы современными ускорителями частиц. Физики надеются, что их недавно приобретенные знания о кварках помогут им понять, почему вся материя имеет массу и почему массы различных атомов, составляющих вселенную, имеют конкретные значения, которые они имеют. Кварковая теория материи успешно объяснила многие аспекты физики, которые ранее не поддавались пониманию. Возможно, когда-нибудь эта теория сможет объяснить проблемы загрязнения почвы, воды и газа.

2.2.4. Системы частиц

Физический мир демонстрирует три состояния вещества – твердое, жидкое и газообразное (воздушное), как показано на рисунке 2.1. Когда почва сухая, она находится в твердом состоянии; когда она насыщена влагой, она становится двухфазной системой; если почва частично насыщена, она находится в трехфазной системе, включающей твердое, жидкое и газообразное состояния. Независимо от состояния вещества, микроструктура состоит из частиц.

Напряженно-деформированные отношения почвы зависят от поведения сцепления двух или более частиц. Содержание воды в почве и поток воды через почву зависят от энергии между частицами. Следовательно, на систему частиц влияют энергии связи между частицами.

Состояние материи	Типы энергетического поля
Газ (воздух)	<ul style="list-style-type: none"> • Механическое энергетическое поле • Поле тепловой энергии • Электроэнергетическое поле • Магнитное энергетическое поле • Радиационное энергетическое поле
Жидкость (вода)	
Твердое состояние (почва)	



Рисунок 2.1. Системы частиц, состояния вещества и типы энергетических полей.

2.3. ЭНЕРГЕТИКА, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ЧАСТИЦ

2.3.1. Энергия между частицами

Базовая физика и химия указывают на то, что градиенты энергии являются основными причинами движения частиц из одного места в другое. Движение частиц, будь то монотонное или динамическое, происходит от воздействия на частицы таких энергий, как потенциальная, тепловая, электрическая и магнитная.

2.3.1.1. Связь между частицами

В атомах и молекулах, содержащих частицы почвы, существуют два основных типа связей: первичная связь и вторичная связь. Первичная связь – это связь между атомами, образующими молекулы. Вторичная связь – это атомы в одной

молекуле или ионная связь. Дальнейшее обсуждение прочности сцепления будет представлено в разделах 2.5 и 4.5

2.3.1.2. Силы притяжения и отталкивания

Все частицы почвы несут электрический заряд. Эффект этого заряда зависит от того, управляется ли частица ее массой (то есть песком, гравием) или поверхностными силами (то есть частицами, подобными глине). На частицы ила влияют как массы, так и поверхностные силы. Когда две глинообразные частицы находятся близко друг к другу, между частицами существуют чистые силы притяжения или отталкивания. Несколько формул для оценки этих сил представлены в разделе 4.6

2.3.2. Энергия и энергетические поля

В предыдущем разделе мы обсуждали фундаментальную концепцию частиц. Однако частицы по-разному ведут себя в различных энергетических полях; поэтому далее будут рассмотрены различные энергетические поля.

Энергия является работой, которую физическая система способна осуществлять при переходе от одного фактического состояния до указанного исходного состояния. Работа определяется как произведение смещения и составляющая силы в направлении смещения. Источники энергии могут быть получены как от поверхностной силы, так и от силы тела. Поверхностная сила создает источники энергии, включая потенциальную, кинетическую, тепловую, электрическую, магнитную и радиационную, а также силу тела, такую как сила тяжести.

Энергетическое поле определяется как пространство, в котором каждый энергетический заряд реагирует на другой заряд (рисунок 2.2). Другими словами, энергетическое поле – это область влияния вблизи энергетического заряда и взаимодействия между другими энергетическими зарядами.

2.3.3. Силовое поле частиц

Силовое поле частиц – это совокупность отдельных частиц в пространстве, которые взаимодействуют и проявляют поверхностный контакт и/или силы тела. Для практических целей пусть контактные силы (то есть силы, действующие на расстоянии) будут разделены на пять основных групп, а именно:

- поле механической энергии;
- поле потенциальной энергии (энергия положения);
- поле кинетической энергии (энергия движения);
- поле тепловой энергии;
- электрическое поле;
- магнитное энергетическое поле;
- поле энергии излучения.

2.3.4. Электронные поля и окружение

Частицы являются основными структурными единицами для всех материалов; однако каждая частица в различных энергетических полях реагирует по-своему. Другими словами, частицы по-разному реагируют на различные среды. Как показано на рисунке 2.1, существует сходство между явлениями окружающей

среды и энергетическими полями. Объединение явлений окружающей среды и энергетических полей в одну систему показано в таблице 2.2. Таблица 2.2 охватывает пять различных энергетических полей и представляет пять явлений окружающей среды. Перечислены некоторые важные параметры в каждом энергетическом поле, а также типичные геотехнические проблемы. Во многих случаях некоторые явления или реакции окружающей среды пересекаются в два или более энергетических поля, например поле, возникающее из-за опасных и токсичных отходов, и поле, вызванное проблемой оползня.

Для правильной оценки характеристик окружающей среды в каждой экологической зоне или в каждом энергетическом поле необходимы надлежащие законы или принципы, как указано в таблице 2.2. Например, движение потока из-за гидравлического градиента (потенциальной энергии) будет следовать закону Дарси; однако если движение потока вызвано тепловым градиентом, то оно должно следовать закону Фурье, а если оно связано с электрическим потенциалом, то оно должно следовать закону Ома. Поскольку условия окружающей среды изменяются, поведение почвы также изменяется, следовательно, метод интерпретации также будет меняться.

Есть пять основных энергетических полей, как говорилось в предыдущем разделе. Даже если каждое энергетическое поле имеет свою индивидуальность со своими характеристиками, они взаимосвязаны, как показано на рисунке 2.3. Взаимодействие между различными энергетическими полями, такими как электрический вязкий эффект и термоэлектрический эффект, будет подробно обсуждаться в разделе 9.13.

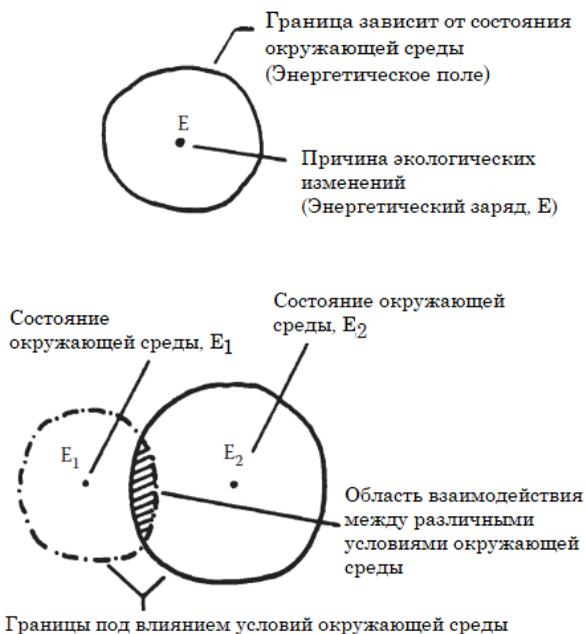


Рисунок 2.2. Принципиальная схема иллюстрирует заряд энергии и энергетическое поле.

2.4. СОСТОЯНИЕ ИДЕАЛИЗИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ

ОБЪЕДИНЕНИЯ

2.4.1. Общее обсуждение

В разделе 2.2 мы ввели основы и допущения теории поля энергии частиц, которые включают элементарные частицы, системы частиц и энергетическое поле. В этом разделе дается дальнейшее обсуждение состояний агрегации идеализированных частиц с целью сравнения характеристик частиц между идеализированными и практическими условиями. Состояния агрегации идеализированных частиц также включают макрометрические твердые вещества и жидкости, а также структуру кристаллов, истинно твердого тела.

Таблица 2.2. Идентификация и классификация экологических зон на основе теории энергетического поля частиц

Экологические геотехнические проблемы			
Экологические зоны и параметры, которые следует учитывать	Отдельная фаза	Мультифаза	Законы / принципы, необходимые для оценки
Окружающая среда (природная и искусственная)			
Механическая энергия Нагрузка, деформация, скорость, вес, масса, волна, звук и т. д.	Простой дизайн фундамента. Проточная пористая среда.	Кислотный дождь; опасные / токсичные отходы. Выделение и мобилизация газа радона. Контроль и хранение ядерных отходов. Оползни; землетрясение.	Закон Дарси Закон Гука Закон Ньютона Законы движения
Тепловая энергия Гидратация Теплота смачивания Кинетические дисперсионные силы Термо-осмос	Замораживание–оттаивание Влажно-сухой цикл Тепловое загрязнение Подземный огонь Растрескивание почвы		Законы термодинамики Закон Фурье Общий газовый закон
Электроэнергия Поляризация Протонная миграция Электродвижущая сила Электропроводность	Ползучесть, вязкость Стрессовая закалка и смягчение Эффект старения Миграция обеззараживание		Закон Кулона Закон Джоуля Закон Джоуля Закон Ампера
Магнитная энергия Электромагнит Ферромагнетизм Электромагнитная индукция Электромагнитные волны Радиационная энергия Процесс распада Радиоактивность Ядерные реакции	Строительные работы		Закон Фарадея Закон Ленца Закон Био–Саварта Атомная физика Ядерная физика

Источник: After Fang, H. Y. (1989a), Proc. 2nd Int. Symp. Environ. Geotechnol., v. 1, pp. 167–194; Fang, H. Y. (1989b), ASCE Environmental Engineering 1989 Specialty Conf., ASCE, New York, pp. 97–104.

2.4.2. Типы связей границ и энергетических диапазонов

Энергетические диапазоны для различных типов связей показаны в таблицах 2.3 и 2.4. Таблица 2.3 суммирует условия устойчивости для различных взаимодействующих пар, которые представляют интерес для нашей темы. Например, энергия связи 4,84 ккал/моль диполь-дипольного взаимодействия воды (таблица 2.3) составляет около половины от 9,7 ккал, необходимой для испарения 1 г-моль воды в точке кипения при нормальном атмосферном давлении. В таблице 2.4 приведены диапазоны для различных типов связей, выраженные в электрон-вольтах (эВ). Если частицы, составляющие систему, попадают в один и тот же предельный диапазон масс, например атомный, коллоидный или макроэлементный, то прочность связи будет в первую очередь определять твердый или жидкий характер системы. Дальнейшее обсуждение прочности сцепления частиц почвы вместе с числовым примером будет представлено в разделе 4.5.

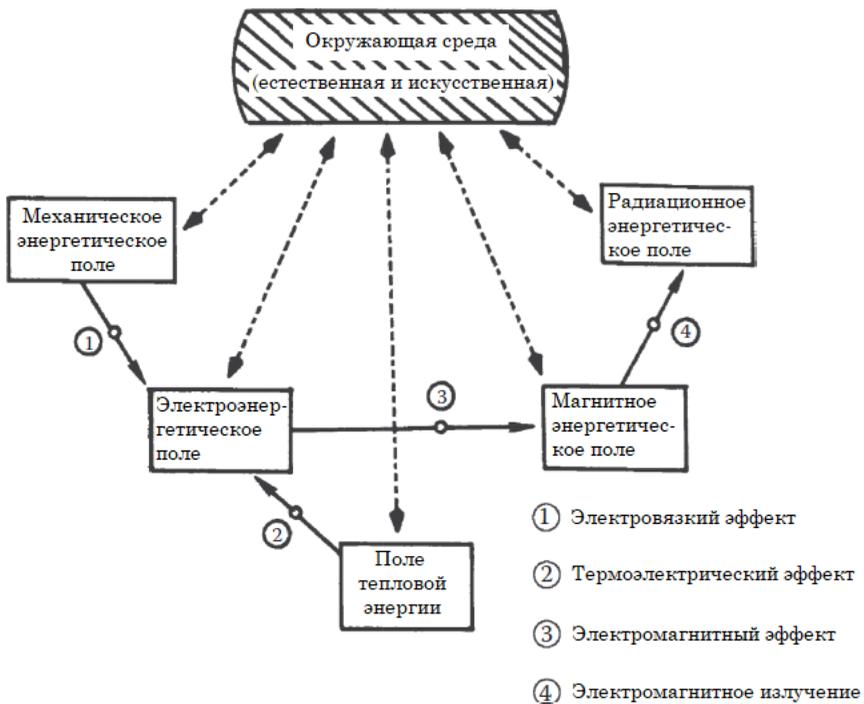


Рисунок 2.3. Принципиальная схема иллюстрирует энергетические поля частиц и их взаимодействие с окружающей средой

2.4.3. Объемные отношения для идеализированных частиц

Типы отношений в структуре между материалами одного и того же характера важны для оценки состояний агрегации частиц. В таблице 2.5 представлены общие объемные отношения для различных состояний агрегации простых соединений. При рассмотрении таблицы 2.5 указываются объемные отношения для соответствующих состояний между объемами конкретного вещества в его наиболее плотном состоянии и в его состояниях плавления, кипения и критического состояния (Trautz, 1922). Для простых химических соединений мы имеем общие зависимости, показанные в таблице 2.5, которые также связаны с различными типами структуры, как показано в таблице 2.6. Существование этих отношений в сочетании с теми, которые были установлены Бачинским (1913) для связи между внутренним трением жидкостей при различных температурах и соответствующими мольными объемами, приводит к плодотворному представлению о твердом и жидком состояниях макромеритических систем и согласованности свойства в этих состояниях как функции отношений объема (Winterkorn, 1970).

Таблица 2.3. Тип притяжения, относящийся к энергии взаимодействия

Взаимодействующая пара	Тип притяжения	Равновесное разделение (Å)	Энергия взаимодействия (ккал / моль)
Na ⁺ F ⁻	Ион–ион	1,88	157
Na ⁺ OH ₂	Ион–диполь	2,14	21,6
OH ₂ OH ₂	Диполь–диполь	2,37	4,84
Ne Ne	Сопряженное электронное колебание	3,30	0,0613

Источник: по Moelwyn-Hughes; цит. по: Winterkorn, H. F. (1963), The Princeton University Conf. on Engineering and World Water Resources, Princeton University, Princeton, NJ, pp. 15–34.

Таблица 2.4. Энергетические диапазоны для разных типов связей

Тип связи	Энергия (эВ ¹)	Типичные свойства	Примеры
Ионический	7–11	Низкая электропроводность при низкой температуре; сильное поглощение в инфракрасном свете	NaCl, KBr, LiF, NaF
Ковалентный	7–12	Большая твердость	Алмаз (C), карборунд (SiC)
Металлический	1–4	Высокая электропроводность	Na, Fe, Al, Cu
Ион-дипольный	0,93	Гидратация или сильно ограниченная вода	Na ⁺ (OH ₂)
Водородный	0,3–0,5	Склонность к полимеризации льда	HF
Диполь-	0,208		H ₂ O–H ₂ O, ил, лёсс
Молекулярный	0,08–0,3	Низкая температура плавления и кипения; отличная сжимаемость в твердом состоянии	CH ₄
Вандерваальсовский	0,0026		Благородные газы; глинистые минералы

$$1 \text{ эВ} = 1,602 \times 10^{-12} \text{ эрг} = 0,386 \times 10^{-19} \text{ кал.}$$

Источник: по Lüscher (1967) (на немецком); см.: Winterkorn, H. F. (1974), Notes on Construction Materials, Department of Civil and Geological Engineering, Princeton University, Princeton, NJ.

Таблица 2.5. Общие объемные отношения для разных состояний агрегации простых соединений

	Объемные коэффициенты для соответствующих состояний			
	Критическое состояние	Состояние кипения	Состояние плавления	Густое состояние
V_0 (критическое состояние) ¹	1	2.66	3.12	3.78
V_b (кипение) ²	0.38	1	1.17	1.42
V_m (плавление) ³	0.32	0.86	1	1.21
V_0 (самое плотное состояние) ⁴	0.27	0.71	0.83	1

¹ При критической температуре и давлении.

² При давлении 1 атмосфера.

³ Экстраполирован на абсолютную нулевую температуру.

Источник: по Trautz (1922) (на немецком); см.: Winterkorn, H. F. (1974), Notes on Construction Material, Department of Civil and Geological Engineering, Princeton University, Princeton, NJ.

Таблицы 2.6. Объемные отношения для разных типов структура и их соответствующих состояний

Структура	Фазовый объем (%)					
	Густое состояние		Состояния плавления		Состояние кипения	
	Твердое тело	Пустоты	Твердое тело	Пустоты	Твердое тело	Пустоты
Гексагонально-ромбоэдрическая	74,1	25,9	61,2	38,8	52,2	47,8
Кубическая	52,4	47,6	43,3	56,7	36,9	63,1

Источник: по материалам: Batschinski (1913), Z. Phys. Chem. v. 84, pp. 643–706; Winterkorn, H. F. (1970), Chemical Dynamics, Wiley-Interscience, New York.

2.5. КРИСТАЛЛ – ИСТИННО ТВЕРДОЕ ТЕЛО

2.5.1. Общее обсуждение

Нормальным состоянием настоящих твердых тел является кристаллическое состояние, характеризующееся четко определенной внутренней структурой и типичными внешними особенностями. Наука о естественных формах и строении истинно твердого вещества традиционно называется кристаллографией или физикой кристаллов. Совсем недавно появился термин «твердое состояние

науки». Данный используемый термин указывает на ученого и его область особого интереса в этой науке.

Кристалл – это твердое вещество, связанное плоскими гранями с определенными геометрическими формами, такими как треугольники, параллелограммы или трапеции. Однако эта внешняя форма должна быть получена путем роста из ядра и должна отражать внутреннее расположение атомов, ионов или молекул, из которых состоит кристалл. Первый закон кристаллографии гласит, что «углы между соответствующими гранями всех кристаллов одного и того же химического вещества всегда одинаковы и характерны для вещества».

2.5.2. Кристаллическая симметрия

Элементы формы кристаллов – грани, ребра и углы – повторяются регулярно.

Чтобы распознать симметрию кристалла, необходимо повернуть его и посмотреть на него со всех сторон. Таким образом, легко понять, что некоторые грани, ребра и углы идентичны соответствующим элементам других кристаллов и их можно воссоздать, используя простые операции, такие как вращение вокруг оси или вращение в сочетании с отражением, которое дает зеркальное изображение после определенных углов вращения. В то время как всякая возможная кристаллическая симметрия может быть выражена этими двумя операциями, обычно различают следующие четыре типа симметрии.

1. Центр симметрии, который действует как фокус оптической линзы, создавая для каждой грани параллельную, но перевернутую двойную сторону на противоположной стороне кристалла.

2. Оси симметрии, которые проходят через кристалл и вокруг которых можно повернуть кристалл так, чтобы при повороте на угол 60° , 90° , 120° или 180° кристалл находился в относительном том же положении, что и вначале. Поскольку при полном повороте на 360° одинаковое относительное положение будет получено 6, 4, 3 и 2 раза соответственно, соответствующие оси вращения называются 6-, 4-, 3- и 2-валентными. 1-валентная ось указывает на то, что каждая грань кристалла уникальна и не имеет соответствующей грани на любой другой части кристалла. Оси симметрии могут или не могут быть объединены с центром симметрии.

3. Плоскости симметрии, делящие кристаллы на две части, которые связаны друг с другом как объект и его зеркальное отображение, также называют двусторонними. Плоскости симметрии могут существовать в сочетании с осями и центрами симметрии.

4. Поверните оси отражения, в которых за поворотом грани на определенный угол следует отражение в плоскости, перпендикулярной оси вращения, для создания эквивалентной грани.

Наивысшей симметрией обладает кристалл, который имеет наибольшее количество элементов симметрии. Систематическое изучение различных элементов симметрии и их комбинаций показало, что существует 32 различных класса симметрии. Представителем класса высшей симметрии является

гексакисоктаэдр, 48 граней которого могут быть получены из одной единственной грани с помощью задействованных элементов симметрии. Низший класс представлен формой, в которой каждая грань отличается от любой другой. Эта форма кристаллизации характерна для бихромата калия.

2.5.3. Кристаллические системы

Эти 32 класса могут быть организованы в 6 систем симметрии (рисунок 2.4). Принцип упорядочения для них – это тип системы координат, который лучше всего подходит для выражения соответствующих граней кристалла простыми рациональными индексами.

1. *Кубическая система.* В кубической системе, которая охватывает типы кристаллов с наивысшей степенью симметрии, опорные координаты такие же, как и в геометрии пространства. Это три оси общего происхождения, каждая под углом 90° относительно остальных. Все направления эквивалентны, что означает, что пространство или тело, находящееся в пространстве, имеют одинаковые свойства во всех направлениях.

2. *Гексагональная система.* Гексагональная система характеризуется 6- или 3-валентной главной осью, перпендикулярной которой являются три оси, образующие углы 60° между собой.

3. *Тетрагональная система.* Тетрагональная система имеет одну 4-валентную главную ось и две оси под прямым углом друг к другу и к главной оси. Малые оси эквивалентны друг другу, но не главной оси.

4. *Орторомбическая система.* Орторомбическая система имеет три оси под прямым углом друг к другу; эти оси, однако, не эквивалентны.

5. *Моноклиная система.* Моноклиная система отличается от вышеупомянутой тем, что она имеет главную ось и одну вспомогательную ось под прямым углом друг к другу, тогда как вторая вспомогательная ось образует с главной осью угол, отличный от 90° . Ни одна ось не эквивалентна какой-либо другой.

6. *Триклинная система.* В триклинной системе все три оси неэквивалентны и находятся под углами, которые отличаются друг от друга и от прямого угла.

Оси называются эквивалентными, когда физические свойства кристалла одинаковы в направлении осей. Они называются неэквивалентными, если физические свойства различны в разных направлениях оси. Этими физическими свойствами могут быть механическая прочность, упругость, тепловые и оптические характеристики и т. д. Оптические характеристики кристаллов особенно важны. Их изучение формирует ветвь кристаллографии, которая называется кристаллооптикой.

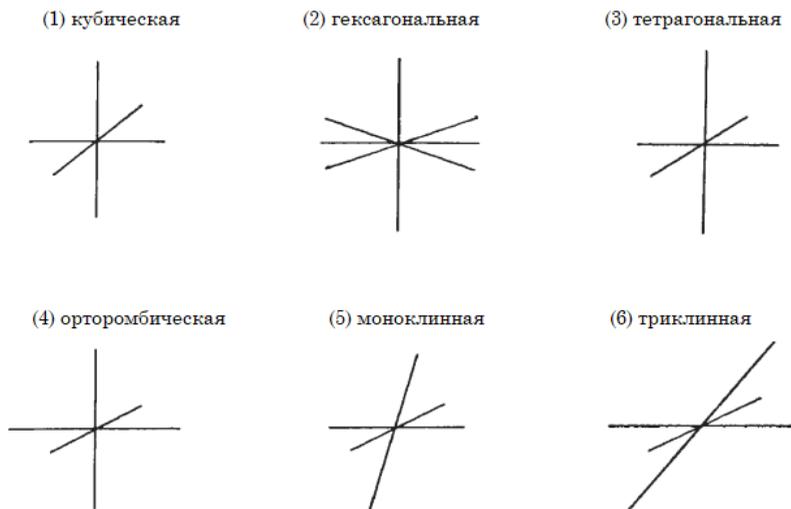


Рисунок 2.4. Кристаллические системы. Все кристаллы принадлежат одной из шести кристаллических систем.

2.5.4. Классы кристаллов

Прежде чем дать простое схематическое представление о связи между 32 классами кристаллов и 6 системами симметрии, желательно ввести несколько символов для типичных комбинаций симметрии (таблица 2.7). Распределение 32 классов кристаллов по 6 системам симметрии показано в таблице 2.8.

2.5.5. Кристаллические решетки

Предшествующая обработка элементов, классов и систем симметрии не требовала каких-либо предположений относительно внутренней структуры реальных кристаллов, хотя взаимосвязь между внутренней структурой и внешними геометрическими особенностями кристалла была признана со времен Стено в 1669 году. Предполагая, что вещество состоит из очень маленьких дискретных частиц, называемых атомами, Браве в 1848 году показал, что все кристаллы могут быть построены путем упорядоченного расположения атомов в пространстве в так называемых пространственных решетках. В частности, он показал, что только 14 типов единичных решеток или ячеек решетки были необходимы для построения всех возможных типов пространственных решеток. Эти основные типы решеток или ячейки были названы решеткой Браве:

- 1) простая кубическая решетка с атомом или ионом в каждом углу куба;
- 2) объемноцентрированная кубическая решетка, такая же, как (1), но с дополнительным атомом в центре куба;
- 3) гранецентрированная кубическая решетка, такая же как (1), но с дополнительным атомом в центре каждой из шести граней;
- 4) базоцентрированная гексагональная решетка;

- 5) ромбоэдрическая решетка;
- 6) простая тетрагональная решетка;
- 7) объемноцентрированная тетрагональная решетка;
- 8) простая ромбическая решетка;
- 9) простая гранецентрированная ромбическая решетка;
- 10) объемноцентричная ромбическая решетка;
- 11) гранецентрированная ромбическая решетка;
- 12) простая моноклиновая решетка;
- 13) боковая центрированная моноклиновая решетка;
- 14) триклинная решетка.

Таблица 2.7. Символы для типичных комбинаций симметрии кристаллических классов

	Символ	Комбинация симметрии
1.	O	Группа вращения октаэдра
2.	T	Группа вращения тетраэдра, состоящего из четырех 3-валентных и трех 2-валентных осей
3.	C _n	Циклические группы: C = ось вращения, n = ее валентность
4.	D _n	Группа диэдров: n-валентная ось с n перпендикулярными двухвалентными осями
5.	V	Группа четырех: три неэквивалентные оси, перпендикулярные друг другу

Таблица 2.8. Распределение 32 кристаллических классов по шести системам симметрии

Класс	Символ	Класс	Символ
I. Регулярная или изометрическая система			
(1)	O _h	(4)	T _d
(2)	O	(5)	T
(3)	T _h		
II. Гексагональная система			
(6)	D ₆ ^h	(12)	C ₃ ⁱ
(7)	C ₈ ^v	(13)	D ₃ ^h
(8)	C ₈ ^h	(14)	C ₃ ^v
(9)	C ₆	(15)	C ₃ ^h
(10)	D ₆	(16)	C ₃
(11)	D ₃ ^d	(17)	D ₃
III. Тетрагональная система			
(18)	D ₄ ^h	(22)	D ₄
(19)	C ₄ ^v	(23)	V ^d
(20)	C ₄ ^h	(24)	D ₄
(21)	C ₄		
IV. Ромбическая система			
(25)	V ⁿ	(27)	V
(26)	C ₂ ^v		
V. Моноклиновая система			
(28)	C ₂ ^h	(30)	C ₂
(29)	C ₂		
VI. Триклинная система			
(31)	S ₂	(32)	C ₁

Примечание:

- Верхние индексы: h, d, v, i обозначают соответственно горизонтальную, диагональную и вертикальную плоскости симметрии и инверсию центра симметрии.

- Числовые индексы обозначают валентность осей симметрии.

- C₂ – центр симметрии, S₂ – двухвалентное, а S₄ – четырехвалентное вращение плюс ось отражения.

Браве предвосхитил физические знания, которые могут быть доказаны только после открытия рентгеновских лучей, и с его 14 типами пространственных решеток была дана схема упорядочения для 230 возможных пространственных групп, существование которых было доказано только в 1891 году Шонфлюсом после обширных геометрических исследований. Для получения дополнительной информации см. стандартные учебники по теоретической неорганической химии, например авторов Day и Selbin (1969).

2.6. ГРАНУЛЯРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И СВОЙСТВА ИХ УПЛОТНЕНИЯ

2.6.1. Общее обсуждение

В целом структура почвы может быть сгруппирована в две категории – макро- и микроструктуры. Макроструктура, связанная с крупными размерами частиц почвы, колеблется от 0,074 до 0,3 м. Микроструктура имеет частицы почвы размером менее 0,074 мм. Для практического применения макроструктурированные материалы называются зернистой почвой, а также несвязной почвой. Структура не клейкого гранулированного грунта является важной частью дисциплины гранулометрии. Структуры различны, и в целом они меньше подвержены влиянию окружающей среды по сравнению со связной почвой.

Первичная структура несвязного грунта относится к естественному расположению составляющих частиц грунта, и это можно рассматривать как непрерывную систему, такую как массив песка или гравия или как естественный вторичный элемент в связном грунте, таком как «почвенная отдельность». Всё это требует изучения и измерения размеров, формы и особенностей поверхности отдельных частиц, а также влияния этих свойств и градации частиц на характеристики структур, свойства механической стойкости и проницаемость многочастных систем. Гранулометрия же имеет дело главным образом с типом материалов, перечисленных выше, многие из ее законов имеют геометрическую природу и одинаково верны и для частиц атомного размера, и для гравия и валунов. Таким образом, знания, первоначально полученные при изучении совокупности атомов и молекул, могут быть использованы для песчаных и гравийных систем и наоборот.

2.6.2. Измерение гранулированных частиц

Гранулированные частицы подразделяются по размеру, форме и характеристикам структуры. Часто форма частиц задается в общих терминах,

таких как сферическая, округлая, угловая и неправильная. Размер частиц определяется просто различием между валуном, булыжником, гравием и песком; это будет обсуждаться в разделе 3.4.

2.6.2.1. Измерение размера

Гранулированные частицы делят по размеру и форме частиц. Размер частиц может быть определен их объемными отношениями или прямым измерением. Объемные зависимости могут быть выражены как объем фазы, абсолютный объем, коэффициент пустотности или пористость. Методы измерения требуют штангенциркули для крупных деталей. Более мелкие частицы могут быть определены с помощью ситового анализа, методов седиментации и элюирования или косвенной оценки по площади поверхности материала.

2.6.2.2. Измерение формы

Истинная форма может характеризоваться наиболее близкой геометрической формой – цилиндрической, эллиптической, кубической, призматической, пластинчатой и игольчатой. Некоторые обычно используемые параметры для описания сыпучих материалов включают эффективный размер и коэффициент однородности. Термин эффективный размер, D_{10} , как определено из анализа сита (ASTM D422-72), представляет собой размер отверстия сита, который позволяет проходить 10 % гранулированного материала и сохраняет 90 %. Коэффициент однородности C_u представляет собой отношение размера проходных отверстий экрана, составляющих 60 %, к проходным 10 %. Дальнейшее обсуждение с числовым примером будет представлено в разделе 4.4.

Форма частиц также может быть выражена численно, например, используя сферичность, объемный коэффициент, коэффициенты удлинения и плоскостности и коэффициент формы. Измерение размера и формы гранулированных почв приведено в таблице 4.2. Процедуры расчета дали Winterkorn и Fang (1991).

2.6.3. Характеристики упаковки сыпучих материалов

Характеристики структур сыпучих материалов зависят главным образом от насыпной плотности структурных систем. После сбора гранулированных частиц, помещенных в контейнер, общий объем системы может быть измерен при делении на вес образца, что приводит к объемной плотности. Путаница может возникнуть из-за использования термина плотность, когда единица веса является фактически измеренной величиной. Тем не менее объемная плотность получила широкое инженерное использование, особенно в области геотехнической инженерии. Измеренная масса включает в себя массу твердого вещества в системе плюс любую влагу или газ внутри частицы или то, что прилипло к ее поверхности. Измеренный объем включает в себя как твердые частицы, так и пустоты между частицами. Таким образом, объемная плотность может изменяться от максимального значения, когда частицы находятся как можно ближе друг к другу, до минимального значения, когда имеются большие пустые пространства.

Факторы, влияющие на состояние структуры, включают механические факторы, содержание влаги, характеристики контейнера (Gray, 1968), форму частиц, состояние поверхности и распределение по размерам, как было

рассмотрено и обсуждено Fowkes и Fritz (1974). Влияние характеристик частиц на прочность почвы было изучено Кернером (1970). Почвы с большим количеством угловатых частиц и меньшей сферичностью имели значительно более высокие углы сопротивления сдвигу. Угол трения увеличивается с уменьшением эффективного размера (D_{10}). Это увеличение является значительным с размерами частиц менее 0,06 мм. Дальнейшие обсуждения механических свойств и прочностных характеристик гранулированных систем даны Farouki и Winterkorn (1964) и Siddiqi и соавторами (1987).

2.6.4. Характеристика частиц и их первичная структура

2.6.4.1. Законы гранулометрии

Законы гранулометрии (Winterkorn, 1970) часто используются для оценки характеристик структур, образованных частицами; поэтому краткое изложение этих законов изложено далее. Эти законы были получены из наблюдений и экспериментов на реальных физических системах. Однако в своей наиболее всеобъемлющей форме они отражают абстракции, необходимые для получения максимально простого математического выражения. Следовательно, при применении этих законов к реальным физическим системам абстракции, которые были сделаны при их выводе, должны быть должным образом исправлены. Кроме того, можно ожидать, что эти законы лучше всего выражают поведение реальных физических систем, если их составляющие частицы приближаются к идеальной, то есть сферической форме.

2.6.4.2. Межчастичные силы

Межчастичные силы для различных типов почв варьируются от практически несущественных до прочных электростатических связей, как указано в таблицах 2.5 и 2.6. Тем не менее для гранулированной почвы важна структура частиц и их первичная структура, потому что их межчастичные силы зависят от систем упорядочения (Pauling, 1960).

2.6.5. Системы уплотнения частиц

2.6.5.1. Однородная структура

Теоретически возможные типы «непрерывных, несжимаемых, однородных структур» одинаковых сфер приведены Kézdi (1964). Их пористость колеблется от 26 до 72 %. С шариками размером с песок и закругленными частицами песка на практике очень трудно получить однородную набивку с пористостью выше 50 % или менее 36 %, равно как и уплотнение между этими пределами однородного характера. Фотографии Mogami (1967) показывают, что в песчаной массе с определенной объемной пористостью существуют области регулярно упорядоченных частиц (кубическая, $e = 0,91$; ромбическая, $e = 0,65$ и т. д., где e = коэффициент пустотности) с различными ориентациями, разделенные интерфазами. Чем ниже коэффициент пустотности, тем меньше объемная доля интерфаз и тем больше доля более упорядоченных и плотно упакованных доменов. В отличие от своих геометрических абстракций, материальные сферы в земной среде обладают характеристиками структур, которые зависят от отношения размеров поверхности к объему сферы, адсорбированных слоев газа и

воды и трения между частицами. Как правило, плотность структуры уменьшается с уменьшением размера частиц.

2.6.5.2. Полигональные формы

Для простых многоугольных форм, которые можно соединить вместе без промежуточных полостей, минимальная теоретическая пористость приближается к нулю. Однако обычные методы обработки и уплотнения (раздел 11.2) обычно приводят к более высокой максимальной и минимальной пористости, чем полученные для сфер эквивалентного размера, что особенно верно для частиц щебня, имеющих острые углы и края и шероховатые поверхности. Если углы и края были закруглены естественной транспортировкой или фрезерованием, такие частицы легко упорядочиваются с большей плотностью, чем сферические.

2.6.5.3. Бинарные системы

Для бинарных систем самая плотная система, которая может быть получена со сферами двух разных размеров, это та, в которой более крупные сферы упорядочены с наименьшей пористостью (26 %), а промежутки заполнены в самой плотной структуре сферами, настолько маленькими, что протяженность и кривизна поры стены не влияют на структуру; минимальная теоретическая пористость была бы тогда 6,75 %. Практичной, хотя и очень несовершенной иллюстрацией этого типа структуры является тротуар из макадама, в котором первый слой битого камня одинакового размера укладывается с максимально возможной взаимной блокировкой, а промежутки заполняются последовательно меньшим размером камня и, наконец, песком, и процесс повторяется для следующего слоя. Когда используются смеси более крупных и более мелких частиц, меньшие всегда мешают упаковке больших.

Нормальная пористость слоев компонентов одного размера составляет 50 %, что указывает на их природу в виде угловых разорванных твердых частиц. Вклад частиц меньшего размера в общий объем колеблется только от 21,6 до 25,6 %, в то время как вклад крупных частиц колеблется от 28,9 до 50 %, как пишет Furnas (1931).

2.6.5.4. Тройные системы

Помехи также очевидны в тройных системах. Наибольшая плотность достигается за счет пропорций примерно одной части самого маленького и двух частей материалов большего размера. Системы, состоящие из примерно равных частей всех трех компонентов, демонстрируют наименьшее различие между практически достижимой максимальной и минимальной пористостью. Другие характеристики тройных систем были описаны Kézdi (1964) и Winterkorn (1970).

2.6.5.5. Непрерывные оценки

Непрерывные градации дают смеси с низкой пористостью, требующие небольшого уплотняющего усилия, и поэтому имеют большое практическое значение для стабилизации почвы и изготовления бетонов (Holl, 1969). Чем больше диапазон от максимального до минимального размера частиц, тем меньше пористость системы. Для большинства натуральных материалов с относительно узкой градацией диапазон легко достижимой и воспроизводимой пористости

составляет от 36 до 46 %. Пористость практически плотного состояния обычно на 9,5 % ниже, чем рыхлого.

2.7. ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

В предыдущих разделах мы показали, что различные состояния агрегации вещества являются следствием относительных величин соответствующих дисперсионных и притягивающих сил, действующих на компоненты из твердых частиц. Для настоящих твердых частиц, жидкостей и газов конечными компонентами частиц для наших целей являются атомы и молекулы. Порядок величины энергий притяжения или связи между атомами или парами молекул представлен в таблицах 2.3 и 2.4. Основная дисперсионная сила на атом или молекулу – это кинетическая часть их тепловой энергии, которая составляет:

$$KE = 3/2 N T \text{ на моль} \\ (2.1)$$

или

$$KE = 3/2 k T \text{ на частицу} \\ (2.2)$$

где

KE = кинетическая энергия на моль или на частицу,
N = постоянная Авогадро,
k = постоянная Больцмана,
T = абсолютная температура.

Уравнения 2.1 и 2.2 являются общепризнанными фактами в химии. Используя эти концепции, применяемые к геотехнической инженерии, необходимо сделать некоторые дополнительные обоснования, и читатели должны помнить, что фактическое поле и теоретические условия различны. Важно также взглянуть на некоторые другие подсказки, не для того, чтобы добавлять или повторять устаревшие аргументы, а для того, чтобы указать на те физические и химические свойства материи, которые проще всего представить и понять на основе атомной концепции. С химической точки зрения, эти подсказки происходят главным образом из пропорций, в которых различные вещества реагируют друг с другом, в то время как с физической точки зрения они исходят из свойств газов и твердых веществ. С нашими нынешними табличными знаниями о размере, форме, структуре, а также связях и тепловых энергиях атомов и молекул, мы можем рассматривать химию как молекулярную архитектуру, используя атомы и молекулы как самые маленькие строительные камни.

2.8. ФЕНОМЕН ТВЕРДОГО ТЕЛА, ЖИДКОСТИ И ГАЗА НА ГРАНИЦЕ КОНТАКТА

Различные явления на границе раздела твердое тело – жидкость – газ важны для оценки взаимодействия почва–вода в окружающей среде, а также явления массового переноса ненасыщенной почвы. Некоторые относительно важные термины, тесно связанные с экологической геотехнологией, представлены

следующим образом. Дальнейшие обсуждения вместе с конкретными проблемами будут представлены в главе 10.

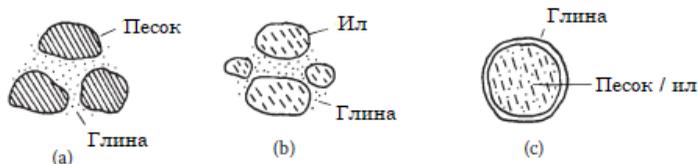
2.8.1. Однофазная граница контакта

Однофазная граница раздела охватывает жидкость–жидкость, твердое вещество – твердое вещество и газ–газ. Среди этих трех границ контакта жидкость–жидкость встречается в геотехнологии окружающей среды чаще всего: чистая вода взаимодействует с загрязненной водой, проникновение соленой воды и смеси нефти и воды. В границах раздела твердое тело – твердое тело можно назвать песчано-гравийные смеси, уголь и щебень; если между ними присутствует влага, то однофазная граница становится двухфазной или даже многофазной. Границы раздела газ–газ (воздух) можно оценить с помощью кинетической молекулярной теории. Однако во многих случаях частицы газа будут поглощаться пылью (разделы 3.10 и 10.7); тогда поведение газ–газ становится границей газ – твердое тело. Граница раздела масло–вода является более сложной, чем любая другая однофазная граница раздела, поскольку сама нефть лежит между формой жидкость – твердое тело – газ. Степень согласованности самой нефти будет влиять на механизмы взаимодействия нефти и воды.

Вторжение соленой воды – это динамическое равновесие движения подземных вод вдоль прибрежной зоны. Это движение соленой воды из океана в прибрежные водоносные горизонты из-за переполнения грунтовых вод. Лиманы также являются проблемой взаимодействия соленой и пресной воды. Это явление происходит там, где реки (пресная вода) встречаются с морем (соленая вода). Это хрупкая и легко разрушаемая система, но все же важная часть экосистемы Земли (раздел 14.4).

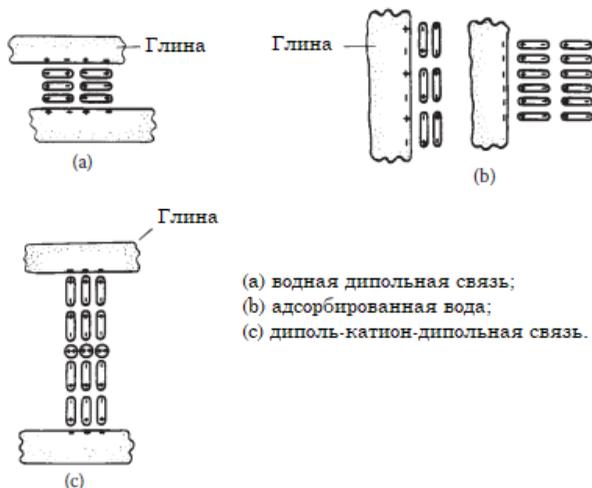
2.8.2. Двухфазная граница контакта

На двухфазной границе контакта характеристики адсорбции играют важную роль. Адсорбция определяется как концентрация вещества на поверхности. Это равномерное проникновение молекул одной фазы между молекулами второй фазы. Все твердые или минеральные частицы имеют тенденцию адсорбировать газы и растворенные вещества, с которыми они контактируют. Чтобы адсорбция была заметной, необходимо, чтобы адсорбент имел большую площадь поверхности. Следовательно, мелкозернистая почва обладает большей адсорбционной способностью, чем более крупные частицы почвы. В общем, величина адсорбции зависит от природы адсорбента, природы адсорбируемого вещества, площади поверхности адсорбента, температуры и давления в системе грунт–вода. Снижение температуры или увеличение давления увеличивает количество адсорбции. Некоторые природные почвы, такие как песчано-иловая связка вместе с влажной связной почвой или песчано-иловый слой, покрытые влажной связной почвой, образуют композитную частицу (рисунок 2.5). Связь между двумя частицами происходит через адсорбированную воду, водный диполь или диполь–катион–диполь. Во многих случаях они носят временный характер, и как только почва становится сухой, сила сцепления между двумя частицами может исчезнуть.



Типичная природа почв:

- (a) песок, связанный с влажной связной почвой;
- (b) ил, связанный с влажной связной почвой;
- (c) песок или ил, покрытый влажной связной почвой.



- (a) водная дипольная связь;
- (b) адсорбированная вода;
- (c) диполь-катион-дипольная связь.

Рисунок 2.5. Макро- и микрокомпозитные частицы почвы. Типичная слабая связь между частицами почвы.

2.8.3. Многофазная граница контакта

Взаимодействие почвы и воды обычно рассматривается как двухфазное взаимодействие; однако в естественном случае это взаимодействие является многофазной границей, потому что независимо от того, является ли почва насыщенной или сухой, она всегда содержит некоторые газы. Другие случаи включают водоотталкивающие почвы (раздел 4.11), где движение воды происходит в водоотталкивающей почве, а явление смачивания представляет собой взаимодействие пар – жидкость – твердое вещество. Все виды переноса загрязнения в почвенно-водных слоях относятся к многофазной группе. Таблица 2.9 суммирует все три границы контакта вместе с типичными проблемами инженерной геологии.

Многофазные явления также происходят в естественных условиях. Водяной пар существует в почвенно-водной системе из-за относительной влажности

воздуха в почве. Давление водяных паров в пустотах почвы увеличивается с температурой. В общем, водяной пар выходит из более теплой зоны и конденсируется в более прохладной почве. В случае жаркой погоды летнего сезона, которая прогревает почву на значительную глубину, сменяемый холодным периодом, который быстро охлаждает поверхность почвы, значительные количества водяного пара испаряются из теплой почвы и конденсируются в верхних слоях почвы. Такое движение может также произойти в осенний сезон, когда нижние горизонты почвы еще не охладилась до температуры поверхности почвы. Кроме того, некоторая влажность может конденсироваться на поверхности почвы из теплой атмосферы с высокой влажностью.

Таблица 2.9. Типы границ контакта, относящиеся к энергетическим полям с примерами

Тип границы контакта	Типичные проблемы инженерной геологии	Энергетическое поле
<i>Однофазная</i>		
Твердое вещество – твердое вещество	Песчано-гравийные смеси (сухие).	
Жидкость–жидкость	Утечка бензина в подземный водоносный горизонт. Вторжение соленой воды. Лиманы. Нефть выливается в реку, океан. Фильтрат просачивается в колодцы. Отложение кислотных дождей в реки, озера. Кислотный дренаж просачивается в реки, ручьи, озера.	
Газ–газ (воздух)	Различные проблемы загрязнения воздуха.	Механическое энергетическое поле
<i>Двухфазная</i>		
Твердое вещество – жидкость	Эрозия; очистка. Ил в реке; седиментация. Различные проблемы загрязнения воды.	
Твердое вещество – газ	Радоновый газ адсорбируется на пыли или суспензии. Различные проблемы загрязнения воздуха.	
Газ (воздух) – жидкость	Газ (воздух) в воде	Поле тепловой энергии
<i>Мультифазная</i>		
Твердое вещество – жидкость – газ (воздух)	Насыщенная или ненасыщенная почва (вадозная зона). Явления массового транспортного переноса. Термоэлектрические и магнитные воздействия на почвенно-водную систему. Радоновый газ в подземных водах.	Комплексное энергетическое поле

2.9. ПОВЕДЕНИЕ ЧАСТИЦ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МЕХАНИЧЕСКОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

2.9.1. Общее обсуждение

Механическая энергия включает в себя как потенциальную, так и кинетическую энергию, которая доминирует в современных концепциях и подходах геотехнической инженерии. Потенциальной энергией в основном является нагрузка, которая включает уплотнение, сжатие, деформацию, изгиб, дробление, разминание, сдвиг и другие процессы. Кинетическая энергия способствует движению воды через пористые среды, вибрации и т. д.

Следует отметить, что все проблемы, связанные с механическим энергетическим полем, рассматриваются как краткосрочные характеристики. Рисунок 2.6 иллюстрирует схематическое сравнение характеристик различных энергетических полей. Конечно, механическая энергия играет самую важную роль; однако такие проблемы не учитывают всерьез местные условия. Поскольку большинство геотехнических проектов происходят в природе, они должны рассматриваться как долгосрочные установки; также нужно учитывать, что они будут подвержены различному воздействию окружающей среды. Кроме того, почва более чувствительна к воздействию окружающей среды, чем любой другой строительный материал; поэтому многие преждевременные или прогрессирующие проблемы часто происходят из-за неожиданного взаимодействия почвы и окружающей среды.

2.9.2. Процесс деформации нагрузки

Когда почва подвергается нагрузке, статической или динамической, увеличение плотности или изменение объема изменяют общую внутреннюю энергию почвы. Этот процесс подразумевает действие потенциальной энергии (энергии положения), кинетической энергии (энергии движения) и тепловой энергии (например, изменение содержания влаги в почве). Эти энергии могут вызвать переориентацию почвенных частиц, которые обладают силами отталкивания или притяжения из-за их адсорбированных ионов и адсорбированных молекул воды, как обсуждалось Lambe (1958 и 1959), Yong и Warkentin (1966), Winterkorn и Fang (1991) и Mitchell (1993). Физико-химическим изменением в ходе геоморфологического процесса могут быть сжатие газов в пустотах, что увеличивает количество растворенных газов в поровой воде, упругую деформацию твердых частиц и характеристики толщины двойного слоя.

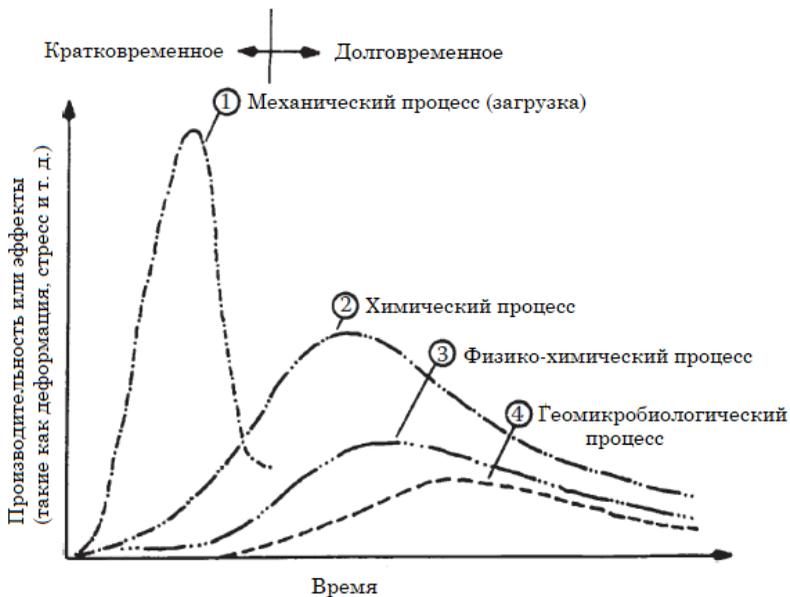


Рисунок 2.6. Схематическое сравнение относительного влияния на производительность почвы различных геоморфологических процессов.

Во время процесса нагрузки-деформации должно быть относительное движение частиц почвы. Сила необходима для преодоления сопротивления трения, возникающего между частицами во время движения. Энергия, потраченная на преодоление сопротивления трения, является тепловой энергией. Существуют три основных типа сопротивления трению, которые характеризуют относительное движение частиц грунта в процессе нагружения:

- 1) когда поверхность частицы сухая;
- 2) частично насыщенное поверхностное трение, известное как гидродинамическая или толстопленочная смазка;
- 3) насыщенное поверхностное или тонкопленочное смазываемое поверхностное трение (Eshbach, 1952).

В молекулярном масштабе волна сжатия запускается всякий раз, когда по твердой частице наносят удар. Например, когда ударный молоток ударяется о крышку сваи, молекулы материала ворса (скажем, стальной ворс) на верхней поверхности подвергаются воздействию силы, вызванной молотком. Согласно второму закону Ньютона, эта сила вызывает ускорение, и молекулы начинают двигаться вниз. В этот момент они толкают соседние молекулы, и импульс передается на конец кучи.

Когда ударная волна или ударная нагрузка перемещаются вдоль сваи, давление мгновенно создается там, где молекулы находятся ближе друг к другу, чем обычно (до того, как свая была взята). Поведение частиц (молекул) вокруг сваи и почвы будет зависеть от типа сваи, типов почвы и местных условий окружающей среды. Явление искажения во время процесса забивания свай происходит главным образом из-за того, что вызывает силу упругости, которая

толкает следующую молекулу вперед. Закон сохранения энергии использовался для интерпретации теории консолидации (Geuze и Bruun, 1948) и теории уплотнения (Li, 1956). В этих системах указывается, что работа, выполняемая в системе, равна изменению общей энергии плюс тепло, передаваемое из системы.

2.9.3. Динамика частиц

В предыдущем разделе мы обсуждали процесс забивки свай. Другие динамические проблемы, связанные с инженерно-геологическими проектами, такие как вибрация машины, взрывные работы в карьере, динамическое уплотнение, волновое воздействие, разжижение, акустика (звуковая волна), техника эха и многие другие, также важны. Некоторые из этих проблем будут более подробно рассмотрены в разделе 11.9.

Основными параметрами динамики частиц являются скорость, ускорение, масса, сила, работа, энергия, волна, вибрация и т. д., как указано в таблице 2.2. В жидкости или газе волны сжатия называются звуковыми волнами. Характеристики звуковых волн включают в себя волновые импульсы, поперечные и продольные волны, а также частоту звуковых волн. Когда ньютоновская механика применяется к движению системы, обнаруживается, что движение можно рассматривать как волновое движение, называемое нормальными режимами колебаний. Частота колебаний в нормальном режиме называется собственной частотой системы. Самая низкая собственная частота называется основной частотой. Когда частота возбуждения близка к собственной частоте вибрирующего тела, амплитуда колебаний этих сил становится исключительно большой. Этот большой отклик на определенной частоте возбуждения называется резонансом. Резонансы большого разнообразия происходят во взаимодействиях молекул.

2.10. ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ НЕСКОЛЬКИХ СРЕД

2.10.1. Общее обсуждение

Во времени поведение почвы не определяется только механической энергией. На рисунке 2.6 показаны механические и другие энергетические поля, отражающие зависимость деформации от времени. Механическое изменение может вызвать значительную деформацию почвы, однако это считается краткосрочным процессом, в то время как другие считаются долгосрочными процессами, причем химический процесс играет наиболее важную роль среди этих процессов. Почва является не только сложным материалом, но и очень чувствительна к местным условиям окружающей среды – больше, чем любой строительный материал. Как показано на рисунке 2.7, если размер частиц почвы изменяется, это также может изменить поведение движения частиц; следовательно, это изменит связь и энергетические характеристики между частицами почвы.

С течением времени местная среда, например, характеризующаяся изменением температуры, заморозанием–оттаиванием, смачиванием–сушкой, проникновением загрязнений, изменит характеристики частиц почвы. Затем поведение почвы изменяется под влиянием тепловых, электромагнитных и энергетических полей,

поскольку они очень тесно связаны с природной средой, однако каждое энергетическое поле имеет свой собственный характер и идентичность. Источники энергии указывают на то, что некоторые из них наследуются естественным путем, а некоторые созданы человеком, как показано в таблице 2.10. Некоторые из относительно важных источников, влияющих на поведение почвы и воды, будут описаны в следующих разделах.

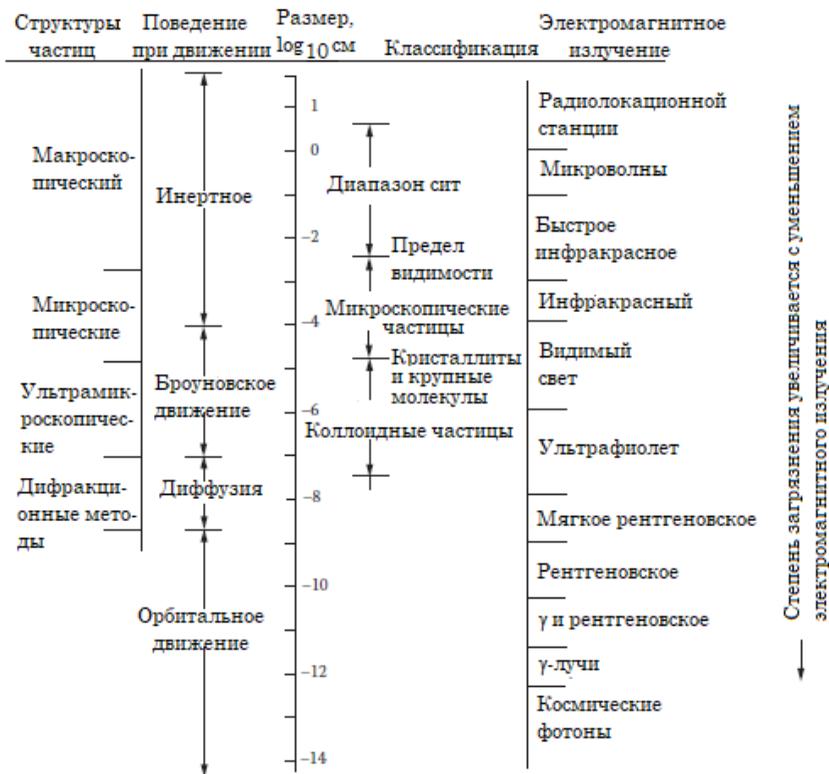


Рисунок 2.7. Размеры частиц почвы, их поведение при движении и методы измерения (по Freudenthal [1950], [на немецком]; см.: Winterkorn, H. F. [1974], Notes on Construction Materials, Department of Civil and Geological Engineering, Princeton University, Princeton, NJ).

2.10.2. Поле тепловой энергии

Существуют три основные характеристики поля тепловой энергии в системе почва–вода.

1. Дополнительные силы, возникающие при добавлении воды к сухой или частично насыщенной почве. Такие силы включают тепло смачивающей силы и кинетическую дисперсионную силу. Эти силы называются экологическими силами или напряжениями (разделы 5.7 и 5.8).

Таблица 2.10. Источники энергии термоэлектромагнитной энергии в полях

Термальные источники

Внутренние источники тепла

- Когда смачиваются твердые частицы
- Когда ионы или молекулы растворяются

Внешние источники тепла

Природная энергия

- Солнечная энергия
- Геотермальная энергия

Искусственная энергия

- Тепловой насос
- Паровые трубы
- Электрические кабельные линии
- Химические или ядерные отходы
- Углекислый газ, произведенный на полигонах
- Подземные пожары

Электрические источники

Внутренние источники

- Взаимодействие почвы и воды
- Термоэлектрический эффект

Внешние источники

- Подаваемый электрический ток непосредственно на массу почвы
- Приложенный электрический ток к системе почва–вода

Магнитные источники

- Природные (постоянные) – железные руды
- Искусственные (временные) – электромагниты

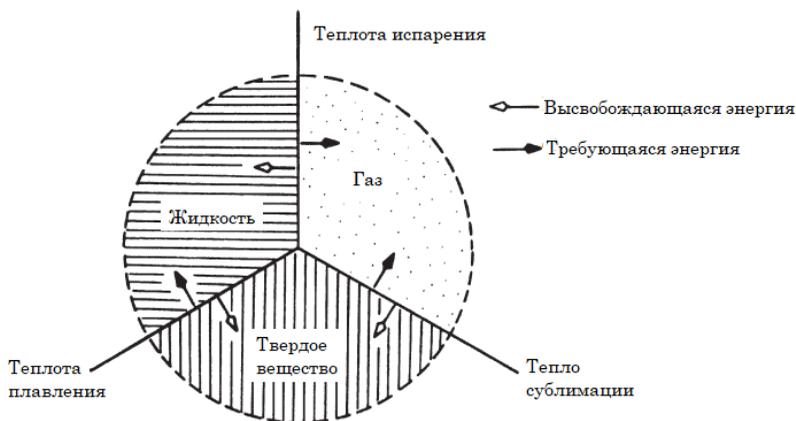


Рисунок 2.8. Изменения состояния вещества в поле тепловой энергии

2. Процесс теплопередачи из-за поля тепловой энергии будет влиять на поведение почвы, воды и воздуха.

3. Физическое состояние вещества, существующего в поле тепловой энергии, будет изменяться в зависимости от изменения температуры. Эти изменения

включают теплоту плавления, теплоту испарения и теплоту сублимации, как показано на рисунке 2.8.

2.10.3. Электронные и магнитные энергетические поля

Электрическая энергия играет важную роль, поскольку она связана с основным поведением почвы и воды, как показано на рисунке 2.3. Некоторые основные характеристики изложены следующим образом:

- поляризация и миграция протонов;
- электрокинетический процесс;
- электровязкий эффект.

Дальнейшие обсуждения этих эффектов будут представлены в главах 8 и 9. Как уже говорилось в предыдущем разделе, термоэлектрические энергии тесно связаны в естественной системе почва–вода. Их распределение в системе происходит случайным образом из-за сложных взаимодействий почвы и воды в окружающей среде. Движение ионов в системе почва–вода также происходит случайным образом. Это связано с бомбардировкой дисперсных частиц молекулами среды и называется броуновским движением. При подаче дополнительного электрического тока на систему грунт–вода частицы остаются в случайном движении, но граница энергетического поля изменяется. Из-за этих изменений, когда в системе взаимодействуют два или более движущихся электрических заряда, термоэлектрические энергии превращаются в термоэлектрические магнитные энергии. Дальнейшее обсуждение электромагнитной энергии будет представлено в разделе 9.13.

2.10.4. Радиационное энергетическое поле

Геотехнические проблемы, связанные с энергетическим полем излучения, можно разделить на четыре основные области:

- 1) удаление или обращение с ядерными отходами;
- 2) контроль радиоактивного и токсичного радонового газа (Rn-222);
- 3) использование ядерной энергии для крупных строительных работ;
- 4) использование гамма-излучения в качестве метода неразрушающего контроля.

Дальнейшее обсуждения этой темы и ее связи с экологической геотехнологией можно найти в главе 10.

2.11. ОБОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ГЕОТЕХНОЛОГИИ

Теория поля энергии частиц, предложенная в этом тексте, в основном относится к геотехнической инженерии. В природе почва обычно состоит из твердой, жидкой и газообразной фаз, состоящих из частиц почвы различных размеров, от небольших валунов (0,3 м) до коллоидно-дисперсных минеральных и органических частиц (> 2 мкм), с минеральными характеристиками,

варьирующимися от практически неизменных фрагментов магматических, осадочных и метаморфических пород через широкий спектр продуктов выветривания до глинистых минералов и гидроокисей природных почвенных образований в биосфере.

Независимо от размера частиц почвы, законы поведения должны быть определены для этого размера или диапазона размеров. Тем не менее, поскольку свойства частиц одного размера или структурного уровня обычно определяются или, по крайней мере, сильно зависят от свойств частиц с более мелкими размерами, влияние структурных единиц на более низких уровнях размеров должно быть изучено и принято во внимание.

Объяснение твердой, жидкой и газообразной стадий вещества с помощью теории энергетического поля частиц зависит от объяснения отношения объема твердых частиц к объемам материала в целом в твердом, жидком и газообразном состояниях. Это общая концепция, которая объединяет все твердые инженерные материалы, представляющие собой системы частиц, которые склеены. Поведение склеенных частиц зависит от:

- 1) размеров, формы и взаимного расположения составляющих частиц системы;
- 2) вяжущих агентов или сил, действующих для удержания вместе частиц компонентов.

Если речь идет об атомах, ионах или молекулах, то рассматриваемое исследование относится к области физики кристаллов или физики частиц (Wop, 1946). Если частицы попадают в видимый диапазон, соответствующая дисциплина называется гранулометрией (Winterkorn, 1967). Тем не менее основные геометрические, симметричные и размерно-структурные взаимосвязи не зависят от размера частиц. Связующее вещество в широком смысле может варьироваться от электронов до гидратированных частиц поргланццемента. Поскольку основные геометрические и симметричные соотношения не зависят от размера частиц, соответствующие геометрические соотношения, обнаруживаемые в сборках компонентов размером с атом, применимы к сборкам компонентов из частиц песка и гравия (и наоборот). Жидкие части почвы, как правило, представляют собой водный раствор электролита и являются неотъемлемым компонентом почвы в качестве разрушающего агента или носителя других разрушающих агентов, действующих на почву или любые другие строительные материалы.

Поскольку вся материя, будь то твердое вещество, жидкость или газ, состоит из частиц разных типов, логично и целесообразно использовать общий знаменатель в качестве основы для оценки инженерного поведения почвы. Кроме того, почва очень чувствительна к местному влиянию окружающей среды, такому как загрязнение, в большей степени, чем любой другой строительный материал. Эти загрязняющие вещества также образуются из различных типов частиц.

2.12. РЕЗЮМЕ

1. В настоящее время сам предмет механики грунтов не имеет единой теории или концепций для анализа всех почв в различных условиях. Поэтому в тексте

предлагается новая теория под названием «теория энергетического поля частиц» с целью унифицированного подхода к анализу поведения почвы в различных условиях окружающей среды.

2. Теория энергетического поля частиц состоит из трех основных компонентов: элементарных частиц, систем частиц и энергетических полей. Объединение этих трех компонентов в одну систему называется «энергетическим полем частиц». Энергетические поля делятся на пять основных групп, а именно: механические, тепловые, электрические, магнитные и радиационные энергетические поля. Таблица 2.2 суммирует характеристики энергетического поля, явлений окружающей среды, а также иллюстрирует типичные проблемы геотехнической инженерии и законы и / или принципы, необходимые для оценки.

3. Все энергетические поля взаимосвязаны друг с другом, как показано на рисунке 2.3. Обсуждаются явления на границе раздела твердое тело – жидкость – газ, связанные с различными геотехническими проблемами окружающей среды.

4. Поскольку термин «окружающая среда», как правило, используется очень свободно, основываясь на концепции энергетического поля частиц, которая соответствует этому абстрактному термину, в этой главе представлен относительно краткий термин.

5. Предполагается, что все объяснения в тексте, касающиеся взаимодействия почвы, воды и окружающей среды, будут основаны на этой предложенной теории энергетического поля частиц. Сравнение между существующей и новой концепцией также проводится, когда это возможно. Следует отметить, что существующая концепция механической энергии является частью предложенной теории поля энергии частицы и одним из пяти энергетических полей.

ПРОБЛЕМАТИКА

2.1. Почему проблемы загрязнения почвы ставят под сомнение современные концепции и методы механики почвы для эффективного анализа поведения почвы в различных условиях окружающей среды?

2.2. Дайте комментарий к теории поля энергии частиц, предложенный в тексте.

2.3. Что является фундаментальной основой для развития теории поля энергии частицы?

2.4. Почему механическая энергия считается краткосрочным процессом и почему тепловая, электрическая и магнитная энергии считаются долгосрочными процессами?

2.5. Определите энергию, энергетическое поле, энергетическое поле частиц и системы частиц.

2.6. Объясните силу поверхности и тела.

2.7. Ученые раскрывают секреты высшего кварка – каковы секреты?

2.8. Как бы вы определили термин «окружающая среда»?

2.9. Обсудите сходство явлений окружающей среды и энергетических полей.

2.10. Обсудите поток энергии при изменении состояния вещества кислотных дождей.

3. Природа почвы и окружающей среды

3.1. ПОЧВА КАК ЕСТЕСТВЕННАЯ ГЕНЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Почвы формируются из горных пород физическими, химическими и биологическими способами, которые обычно связаны с климатом, топографией и деятельностью организмов. Степень перехода от исходного материала к почвенной системе является функцией времени и скорости реакции доминирующих процессов (глава 8). Определение естественной почвы можно обобщить с помощью трех основных категорий.

1. *Инжениринг*. С инженерной точки зрения почва – это любой земной материал, который можно удалить лопатой и ковшом и который является продуктом естественного выветривания. Эта почва включает гравийно-песчаные отложения, сельскохозяйственные, пастбищные, лесные и пустынные почвы, а также мелкозернистые рудные и аллювиальные отложения долин и дельт (Winterkorn and Fang, 1991).

2. *Геология*. С геологической точки зрения почву можно рассматривать как поверхностную неуплотненную мантию распавшегося и разложившегося горного материала, которая при воздействии органических веществ и смешивании с различными количествами органического вещества может создавать условия, необходимые для роста растений. В широком смысле термин «почва» использовался для обозначения всей мантии разрушения горных пород (Keller, 1984; Kiersch, 1991).

3. *Педология*. С педологической точки зрения почва является климатически обусловленным продуктом петрографического и биогенного преобразования внешнего слоя твердой коры (Yuers и соавторы, 1938a); это естественное тело, разделенное на горизонты, различающиеся по типу и количеству минеральных и органических компонентов, обычно неконсолидированных и различной глубины (Joffe, 1949); почва – это уникальное творение, которое отличается от исходного материала морфологией, физическими свойствами и биологическими характеристиками; и почвенный покров Земли можно назвать «педосферой» наряду с атмосферой, литосферой и гидросферой, как показано на рисунке 1.1.

Педологическая почва представляет собой динамическую систему, подверженную влиянию температуры, влажности и биологических циклов и развивающаяся в определенном генетическом направлении под влиянием климата. На скорость этого развития влияют исходный материал, растительность и деятельность человека (Thom and Smith, 1938; Winterkorn, 1944).

3.2. ПОЧВА КАК ПОЛИДИСПЕРСНАЯ СИСТЕМА

Почва представляет собой полидисперсную систему, состоящую из (1) твердых неорганических и органических частиц; (2) водной фазы, несущей вещество в растворе, а иногда и в дисперсии; и (3) газообразной фазы различного состава, функционально связанной с биологической активностью. Водную и газообразную фазы обычно рассматривают как поровое пространство или пористость. Пористость варьируется по количеству и размерным характеристикам от почвы к почве, от слоя к слою и от поверхностных слоев от сезона к сезону.

3.2.1. Характеристика твердой фазы

Почвы как полидисперсные системы могут содержать частицы в диапазоне от ионного размера (10^{-8} см) до гравия и размера камня. Поскольку информация о почве, представляющая интерес, встречается в основном в международной педологической литературе, указывается, что для представления гранулометрического состава используются принятые международные термины и определения (таблица 3.1). Материалы размером более 0,02 мм обычно называют зернистыми; те, которые меньше 0,02 мм, называются илесто-глинистыми материалами. Почва, содержащая более 65 % грубого материала, называется зернистой почвой; те почвы, которые содержат более 35 % ила и глины, называются илесто-глинистыми материалами. В уплотненном состоянии гранулированные почвы содержат зернистый каркас, придающий им хорошую стабильность объема и свойства трения, в то время как илесто-глинистые материалы демонстрируют изменения объема при изменении содержания влаги и обладают низкими углами внутреннего трения.

Таблица 3.1. Диапазоны величины частиц почвы – международные термины и определения

Обозначение	Диаметр (мм)
Валун	> 20
Гравий	2–20
Грубый песок	0,2–2
Мелкий песок	0,02–0,2
Ил	0,002–0,02
Глина	< 0,002

Почвам даны текстурные названия в соответствии со следующей идентификационной картой Бюро автомобильных дорог общего пользования (BPR), которая была взята у Министерства сельского хозяйства США (Davis и Bennett, 1947). Она также находит международное использование в педологии, как показано в таблице 3.2. Объединяя иловые и глинистые фракции в качестве илесто-глинистых материалов, мы можем выделить три основные физические группы минеральных почв (таблица 3.3).

3.2.2. Характеристика жидкой фазы

Химическая формула воды – H_2O , которая представляет собой состав из 88,8 % по массе кислорода (O) и 11,2 % водорода (H). Молекулы H_2O , однако, связаны, а также диссоциируют в зависимости от температуры (Rao, 1933). Если жидкая фаза загрязнена, то следует рассмотреть дополнительную информацию о химическом составе окружающей среды. Эта информация включает химию почвы, роль микроорганизмов в водных химических явлениях, химию атмосферы, геосферу, опасные вещества и т. д. (Palmer и соавторы, 1991). Некоторые из этих свойств будут обсуждаться в разделе 5.3.

3.2.3. Характеристика границы контакта почва–воздух

Часть пор почвы, не заполненных водой, представляют собой границу почва–воздух. Система почва–воздух находится в постоянном обмене с атмосферой, и ее

состав отражает атмосферу, за исключением концентрации тех компонентов, которые используются или образуются в результате микробиологической деятельности в почве. Такими веществами являются кислород (O), который расходуется, и углекислый газ (CO₂), который производится. Атмосферный воздух содержит 20,939 + 0,004 об. % кислорода и 0,031 + 0,0016 об. % диоксида углерода. Согласно Ebermayer (1884), на которого ссылается Winterkorn (1955), доля CO₂ в почвенной атмосфере зависит от всех физических и химических факторов, которые определяют почвенную активность и продуктивность. Типичные данные, касающиеся содержания CO₂ в атмосфере и некоторых почвах, обсуждаются в разделе 13.6. Дальнейшие дискуссии о границе почва–воздух, относящиеся к ненасыщенным почвенно-водным системам, представлены в разделе 5.13.

Содержание кислорода в системе почва–воздух уменьшается в зависимости от увеличения содержания углекислого газа, поскольку углекислый газ происходит из кислорода. В таблице 3.4 представлены тип почвы, поровое пространство и объем твердых частиц природного грунта. Следует отметить, что в естественных почвах всегда есть воздушные пространства, даже если порам позволено забрать всю возможную воду. Конечно, после длительного затопления это воздушное пространство может быть довольно небольшим.

Таблица 3.2. Механический состав грунтов основных классов, принятых Бюро автомобильных дорог общего пользования (BPR)

Класс почвы	Пределы размеров почвенных фракций		
	Песок (%)	Ил (%)	Глина (%)
Песок	80–100	0–20	0–20
Супеси	50–80	0–50	0–20
Суглинок	30–50	30–50	0–20
Илистый суглинок	0–50	50–100	0–20
Опесчаненный иловатый суглинок	50–80	0–30	20–30
Глинистый суглинок	20–50	20–50	20–30
Пылевато-иловатый суглинок	0–30	50–80	20–30
Песчаная глина	55–70	0–15	30–45
Илистая глина	0–15	55–70	30–45
Глина	0–55	0–55	30–100

Источник: на основе данных Геологической службы США.

Таблица 3.3. Процент содержания ила и глины в трех группах минеральных почв

Обозначение	Содержание ила и глины (%)
Зернистые почвы	0–20
Когезионно-зернистые почвы	20–35
Когезионно-незернистые почвы	35–100

Таблица 3.4. Тип почвы, поровое пространство и объем твердых частиц

Тип почвы	Поровое пространство (%)	Объем твердых частиц (%)
Болотная почва	84,0	16,0
Песчаный грунт	39,4	60,6
Лессовый суглинок	45,1	54,9
Глинистый грунт	52,7	47,3

Источник: данные опубликованы в: Blanck, E., ed. (1930, 1939), Handbuch der Bodenlehre, v. 6, Julius Springer, Berlin.

3.2.4. Характеристики почвы в условиях *in situ*

Почвы являются порождением климатических сил и могут считаться производными от них. Эти силы возникают из-за суточных и сезонных колебаний температуры, из-за колебаний влагосодержания, из-за ежегодного набухания и снижения биологического потенциала, а также из-за любого другого периодического явления, вызванного этими факторами. Почвы не являются смесью их компонентов, а представляют собой естественно организованные системы, как показано в разделе о генезисе почв. Эти системы продолжают подвергаться действию сил, которые их сформировали, и их свойства находятся в состоянии постоянного изменения. В результате этого условия почвы *in situ* имеют много общих важных свойств с «живыми» системами и могут почти рассматриваться как живые, даже если мы игнорируем большую микрофлору и микрофауну, рассеянные в почвах, которые превращают почвы в реальные живые системы.

На рисунке 3.1 показано распределение грибов и бактерий в почвенных профилях и горизонтах. Указаны значительные различия в содержании грибов и бактерий для ненарушенных и нарушенных условий в пределах почвенных профилей и горизонтов. Эти явления также указывают на причину того, что ненарушенные и восстановленные образцы почвы имеют значительные структурные различия.

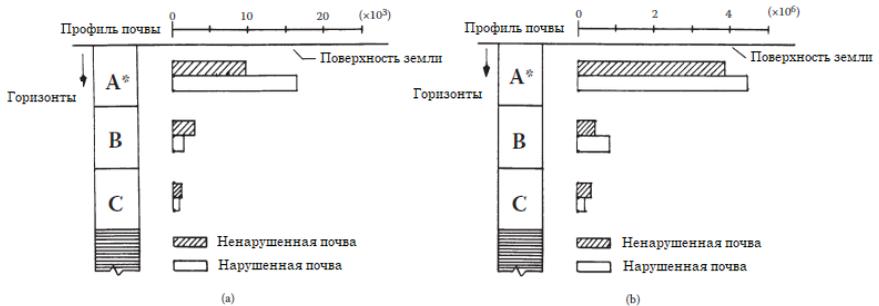


Рисунок 3.1. Распределение грибов и бактерий в почвенных профилях и горизонтах: (a) грибы и (b) бактерии (данные опубликованы в: Iowa Research Bulletin 132; цит. по: Millar, C. E. and Turk, L. M. [1943], Fundamentals of Soil Science, John Wiley & Sons, New York).

3.3. ПОЧВЕННАЯ ТЕКСТУРА, СТРАТА, ГОРИЗОНТЫ И ПРОФИЛИ

3.3.1. Слои почвы и текстуры

Почвы – это трехмерные системы; у них есть двумерный ареал и третье измерение – глубина. Являются ли они геологическими отложениями или сформированы на месте в результате взаимодействия геологического исходного материала, климатических факторов, топографии и живых организмов, почвы демонстрируют ограничения и изменения с глубиной. Горизонтальный, а также

вертикальный переход в другой тип почвы может быть постепенным или резким в зависимости от геологических и почвообразующих факторов. Когда вертикальные изменения обусловлены различными геологическими процессами, результирующие слои называются слоями.

Почва может состоять только из одной размерной доли узкого диапазона, такого как песчаный пляж или лес, или из любого количества размерных фракций в непрерывной или нерегулярной классификации. Размерный состав почвы называется ее текстурой. Камни или гравий, оставшиеся на сите № 4 (4,76 мм), называются крупнозернистым заполнителем (С.А.). Материалы, проходящие через сито № 4, называются мелким заполнителем (Ф.А.). Фракции, которые проходят через сито № 200 (0,074 мм), называются почвенными мелкими фракциями.

3.3.2. Горизонты и профиль

Когда вертикальные изменения обусловлены различными геологическими процессами, результирующие слои называются слоями. Когда вертикальная дифференциация вызвана почвообразующими факторами, результирующие слои называются горизонтами. Набор горизонтов от поверхности почвы до исходной или физически измененной материнской породы называется профилем. Горизонт, содержащий исходный материал или субстраты, обычно называют С-горизонтом. Верхний слой, который простирается от поверхностного осадка разлагающегося растительного мусора до глубины, на которой органическое вещество полностью увлажняется, называется А-горизонтом. Между А- и С-горизонтами лежит В-горизонт, который обычно является местом скопления материала в суспензии или коллоидном растворе, вымываемых из А-горизонта путем просачивания осадков воды. А- и В-горизонты развиваются за счет С-горизонта или исходного материала. Если в трех основных горизонтах произошла четкая дифференциация, они подразделяются на подгоризонты и обозначаются соответственно как А₀₀, А₀, А₁, А₂, А₃, В₁, В₂, В₃ и С₁, С₂. Теоретический профиль почвы, показывающий основные горизонты, представлен на рисунке 3.2.

3.3.3. Профили подзолистой почвы

Степень перехода от исходного материала к почвенной системе является функцией времени и скорости реакции процессов старения (раздел 5.8). Об относительной зрелости почвы судят по развитию ее характерного профиля или совокупности горизонтов. Рассматривая только общие температурные и влажностные компоненты климата, мы находим следующие пять основных корреляций между климатом и типом почвы:

- влажный и холодный климат;
- влажный и жаркий климат;
- холодный засушливый и жаркий засушливый климат;
- сбалансированный климат;
- засоление, подщелачивание и декарбонизация.

В условиях влажного и холодного климата продукты кислотного разложения даже редкой растительности растворяют силикаты железа и алюминия исходного материала в поверхностном минеральном слое и осаждают их в нижних слоях. В результате под темным органическим слоем растительной плесени образуется

выщелоченный беловатый кремниевый слой, покрывающий коричневатый или красноватый слой, содержащий скопления оксидов железа и алюминия, часто склеивающих другие зерна. Этот тип почвы называется подзол, а процесс его формирования называется подзолизацией (USDA, 1938; Fanning and Fanning, 1989). Общие характеристики подзолистых почвенных профилей приведены в таблице 3.5.

Почвенный растительный мусор обычно отсутствует на почвах, образованных под травами.	A ₀₀	Свободный неразложившийся растительный мусор.
	A ₀	Спутанный растительный мусор частично разложился.
А. Горизонты преимущественно неорганических материалов, характеризующихся: <ul style="list-style-type: none"> • максимальным накоплением гумуса; • максимальным элюированием (удаление глины); • развитием гранулированных, крошечных или плоских структур. 	A ₁	Темноокрашенные горизонты с максимальным содержанием органического вещества лучше всего развиваются в крошках или зернистых структурах, при этом: <ul style="list-style-type: none"> • они могут быть элюированы; • они могут отсутствовать в некоторых почвах, измененных в результате обработки и т. д.; • они обычно толстые в черноземах и степных почвах, а в подзолах очень тонкие или отсутствуют.
	A ₂	Светлый горизонт в пределах группы А, имеющий максимальное элюирование (минимальное количество глины), минимальное накопление органического вещества и минимальное развитие зернистой структуры. Обычно имеет слабо развитые структурные единицы, крошка наиболее часто встречается в подзолах, планозолях и солондированных солонцах.
	A ₃	Переходный горизонт: больше похожий на А, чем на В, иногда отсутствует. Обычно имеет крупнозернистую или плохо развитую призматическую или блочную структуру.
В. Горизонты иллювиации характеризуются: <ul style="list-style-type: none"> • накоплением силикатной глины и оксидов железа или алюминия; • или блочными, призматическими или столбчатыми структурами; • или развитием более сильных красных или желтых цветов; • или какой-либо комбинацией этих признаков. 	B ₁	Переходный горизонт: больше похожий на В, чем на А, иногда отсутствует. Обычно имеет слабо развитую ореховую или призматическую или блочную структуру.
	B ₂	Горизонт... <ul style="list-style-type: none"> • максимального накопления силикатной глины или оксидов железа и алюминия; • или максимального развития блочной, призматической или столбчатой структуры; • или развития более сильных красных или желтых цветов; • или какой-либо комбинации этих признаков.
	B ₃	Переходный горизонт: больше похоже на В, чем на С.
С. Относительно неизменный, неконсолидированный исходный материал	C ₁	Слегка измененный родительский материал.
	C ₂	Родительский материал переменной длины.
Д. Любой слой, лежащий в основе С или В, в отличие от материала, из которого сформировалась почва	D	D _r используется для консолидированной породы, подобной той, из которой развился С.

Рисунок 3.2. Теоретический профиль почвы, показывающий основные горизонты (по HRB [1957], HRB Special Report 25, 32p. Этот материал является собственностью

правительства США, но находится в открытом доступе и не защищен авторскими правами).

Таблица 3.5. Общая характеристика подзолистых почвенных профилей

Горизонт	Толщина	Описание
A ₀₀	1 дюйм или более	Опавшая листва.
A ₀	½ дюйма или более	Ферментирующие листья, веточки и дерево; гуминовая кислота органическое вещество.
A ₁	¼ дюйма или более	Темно-серая смесь кислого гумуса и минеральной почвы; как правило, горизонт очень тонкий и полностью отсутствует во многих местах.
A ₂	½–30 дюймов или более	Беловато-серый или бледно-розовато-серый, сильно выщелоченный, кислый, листоватый (тонко слоистый) грунт легкой или средней текстуры.
B ₂	2–10 дюймов.	Темная кофейно-коричневая илистая или суглинистая почва, содержащая много органических веществ и оксидов железа; иногда цементируется.
B ₃	4–10 дюймов	Желто-коричневый или коричневато-желтый суглинок или суглинок с небольшим количеством органического вещества.
B ₃₁	4–10 дюймов	Переходный и исходный материал обычно более или менее кислый и песчаный, но местами может быть несколько известковым.

Источник: по USDA (1938), Soils and Men, Yearbook of Agriculture, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не подлежит защите авторских прав.

3.3.4. Упрощенный профиль почвы и система горизонтов PCA

3.3.4.1. Общее обсуждение

За прошедшие годы система буквенных обозначений разных горизонтов несколько раз менялась и расширялась. Обозначения, показанные на рисунке 3.3, называются «Основные горизонты» (PCA, 1992). В основных горизонтах есть еще 22 подразделения, которые называются подчиненными различиями. Полное описание этих горизонтов и подчиненных им дано Министерством сельского хозяйства США (USDA, 1981, 1986). Поскольку основные горизонты слишком обширны, чтобы описывать их здесь, суммируются только общие характеристики O-, A-, B-, C- и R-горизонтов. O-, A- и B-горизонты представляют собой слои, которые были изменены в результате выветривания, в то время как C-горизонт не изменяется в процессе почвообразования. Горизонт R, расположенный под другими слоями почвы, является основным материалом в его первоначальном состоянии формирования.

3.3.4.2. Горизонты

1. *O-горизонт:* O-горизонт состоит в основном из органического мусора, такого как листья, веток, мха и лишайников, которые отложились на поверхности.

2. *Горизонт*: исходный верхний слой почвы имеет одинаковый цвет и текстуру по всей глубине. Его толщина обычно составляет 3–4 метра, но может варьироваться от 5 до 75 сантиметров. Он также упоминается как верхний или поверхностный слой почвы.

3. *В-горизонт*: В-горизонт – это слой почвы чуть ниже А-горизонта. Его толщина обычно составляет 25–35 см, но может варьироваться от 10 до 3 м. В-горизонт также называют грунтом (подпочвой).

Руководство по обследованию почв, 1951 Руководство по обследованию почв,
Дополнение от мая 1962 года июнь 1981 года

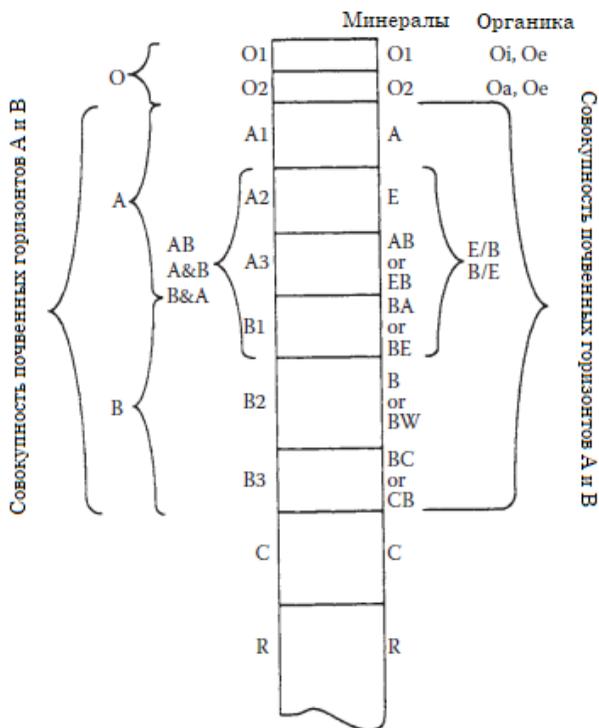


Рисунок 3.3. Упрощенный почвенный профиль, показывающий основные горизонты (по PCA [1992], PCA Soil Primer, Portland Cement Association, Skokie, IL, 40p.).

4. *С-горизонт*: этот слой почвы находится чуть ниже В-горизонта. Он сильно отличается от В-горизонта. Он может иметь неопределенную толщину и простирается ниже любой высоты, представляющей интерес для инженера-геотехника. С-горизонт может быть представлен глиной, илом, песком, гравием, комбинациями этих почв и камней. С-горизонт также называют исходным материалом или материалом почвы.

5. *Р-горизонт*: R-горизонт – это слой твердой коренной породы, лежащий под С-горизонтом. Он имеет неопределенную глубину и находится в своем первоначальном состоянии формирования.

3.4. СИСТЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ И КЛАССИФИКАЦИИ ПОЧВ

3.4.1. Общее обсуждение

Система классификации предоставляет язык, который передает информацию кратко без необходимости подробного описания. В области инженерно-геологических разработок существуют многочисленные системы идентификации и классификации почв, такие как Единая классификация почв (ASTM D2487-93), классификации почв Американской ассоциации государственных служащих автомобильных дорог и транспортных средств (AASHTO M145-88), Федерального управления авиации (FAA) и Министерства сельского хозяйства США (USDA). В сравнении между ними, система классификации почв USDA относительно тесно связана с экологической геотехнологией. В частности, система USDA полезна для работы с мелкими фундаментами, свалками, установками контроля опасных отходов, заболоченными территориями, системами поверхностного и подземного дренажа, а также исследованиями эрозии. Поэтому метод USDA будет подробно представлен в этой главе по сравнению с другими методами.

3.4.2. Унифицированная система классификации почв (ASTM D2487)

Единая система классификации почв выросла из классификации почв, разработанной Casagrande в 1948 году. Система была значительно пересмотрена в 1983 году (Howard, 1984). Единая система делит почвы на крупнозернистые и мелкозернистые. Крупнозернистая почва содержит более 50 % остатка в сите № 200, а мелкозернистая почва проходит через это сито. Для мелкозернистой почвы дальнейшее разделение включает неорганические и органические почвы. Высокоорганические почвы содержат в основном органическое вещество; те, которые имеют органический запах и темный цвет, классифицируются как торф. Длинные, подробные системы классификации и диаграммы могут быть легко получены в любых стандартных геотехнических учебниках и не будут здесь воспроизведены.

В области экологической геотехнологии размер мелкозернистой почвы является более важным по сравнению с зернистой почвой, поскольку мелкозернистая почва более чувствительна к окружающей среде (раздел 5.12). Следовательно, необходима часть классификации почвы, основанная на диаграмме пластичности, как показано на рисунке 3.4. Диаграмма пластичности используется для классификации мелкозернистых почв и мелкозернистой фракции крупнозернистых почв.

При рассмотрении рисунка 3.4 линия A отделяет неорганические глины от неорганических илов. Неорганические глины лежат выше A-линии, а неорганические илы лежат ниже A-линии. Органические илы наносятся в той же области под линией A и имеют верхний предел пластичности (он же предел текучести; LL) в диапазоне от 30 до 50, что и неорганические илы средней сжимаемости. Органические глины строятся в той же области, что и неорганические илы с высокой сжимаемостью ниже A-линии, и их LL больше, чем 50. Уравнение A-линии: горизонтальное при $PI = 4$ до $LL = 25,5$, $PI = 0,73$

(LL–20). Уравнение U-линии: вертикальное при LL = 16 до PI = 7, затем PI = 0,9 (LL–8). Эта U-линия является верхним пределом отношения индекса пластичности к пределу текучести для обычно используемых мелкозернистых почв.

3.4.3. Система классификации почвы AASHTO (AASHTO M145-88)

Система классификации Американской ассоциации государственных служащих автомобильных дорог и транспортных средств (AASHTO) основана на системе классификации Бюро общественных дорог США (BPR). Они классифицировали почвы в соответствии с их характеристиками как грунт под дорожными покрытиями. Есть семь основных групп, от A-1 до A-7. Элементы каждой группы имеют одинаковые несущие значения и технические характеристики при нормальных условиях движения. Лучшие почвы для дорожных участков классифицируются как A-1, следующие по качеству A-2 и т. д., а самые плохие почвы классифицируются как A-7. Группа A-2 подразделяется на подгруппы с A-2-4 по A-2-7 – последнее число идентифицирует тип присутствующей фракции сита № 200 (ASTM D422-72). Дифференциация между качеством в определенной группе проводится по групповому индексу (GI), который рассчитывается следующим образом:

$$GI = (F - 35) [0,2 + 0,005(LL - 40)] + 0,01(F - 15)(PI - 10)$$

где F – процент, проходящий через сито № 200 (ASTM D1140-71), LL – предел текучести в процентах (ASTM D423-66), а PI – индекс пластичности, также в процентах (ASTM D424-71). Индекс группы дан в скобках после групп почв и должен быть округлен до ближайшего целого числа. Значения группового индекса колеблются от 0 до 20. Чем меньше значение, тем лучше качество почвы для строительства дорог в рамках этой подгруппы. Классификация почв субстрата AASHTO показана в таблице 3.6.

3.4.4. Другие системы классификации почв

Классификация почвы Федерального авиационного агентства (FAA) основана на градации почвы, консистенции почвы, экспансивных характеристиках почвы и калифорнийском коэффициенте несущей способности (CBR). Эта система в основном используется для проектирования аэродромных покрытий. Классификация на основе прочности на растяжение будет представлена в разделе 6.7. Эта классификация полезна для выбора стабилизирующих материалов для улучшения грунтов. Кроме того, испытание на растяжение также полезно для оценки степени чувствительности почвы к окружающей среде (раздел 5.12).

Для сравнения, на рисунке 3.5 показаны системы классификации почвы Unified и AASHTO на диаграмме треугольной классификации USDA. На этой диаграмме показаны взаимосвязи этих трех методов классификации, где на рисунке 3.5a представлена классификация USDA, на рисунке 3.5b представлена AASHTO, а на рисунке 3.5c представлена Единая система классификации. Пример 3.1 используется для иллюстрации процедур этих трех методов.

Таблица 3.6. Система классификации почв AASHTO

Основная классификация	Гранулированные материалы (35 % или меньше, проходящие через № 200)							Илисто-глинистые материалы (более 35 %, проходящие через № 200)				
Групповая классификация	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7-5; A-7-6	
Ситовой анализ, процентное прохождение												
№ 10	50 max	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
№ 40	30 max	50 max	51 min	—	—	—	—	—	—	—	—	
№ 200	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min	
Характеристика фракции, проходящей № 40												
Верхний предел пластичности	—	—	—	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	
Индекс пластичности	6 max	—	NP	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min	
Обычные виды значимых составляющих материалов	Каменные фрагменты, гравий и песок		Хороший песок	Илистый или глинистый гравий и песок				Илистые почвы		Глинистая почва		
Общая оценка как грунтового основания	От хорошо до отлично							Хорошо для бедных почв				

Индекс пластичности подгруппы A-7-5 равен или меньше LL – 30. Индекс пластичности подгруппы A-7-6 больше, чем LL – 30. *Источник:* AASHTO (1986, 1988), AASHTO Materials, Part 1, Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

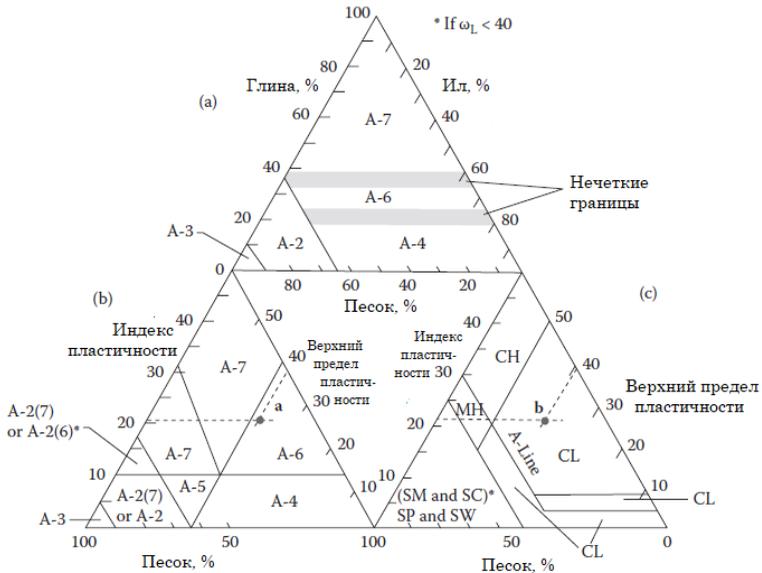


Рисунок 3.5. Взаимосвязи (а) треугольной диаграммы USDA, (б) классификации почвы AASHTO и (с) Единой классификации почвы (по Handy, R. L. & Fenton, T. E. [1977], TRR

642, pp. 13–91. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в свободном доступе и не подлежит защите авторских прав).

Пример 3.1

Почва имеет верхний предел пластичности (LL) = 38, индекс пластичности (PI) = 21 и 82 % при прохождении через сито № 200. Используйте Единую классификацию почвы и систему классификации AASHTO, чтобы охарактеризовать эту почву.

Решение

(а) *Классификация AASHTO*

Используйте рисунок 3.5 (b). Верхний предел пластичности = 38 и индекс пластичности = 21, классификация AASHTO – А-6 (А-6: глинистые почвы), как показано в точке «а». Индекс группы (GI) затем вычисляется из уравнения 3.1 следующим образом.

(b) *Групповой индекс (GI)*

Подставим LL, PI и проценты, перенеся данные сита № 200, в уравнение 3.1:

$$GI = (82 - 35) [0,2 + 0,005 (38 - 40)] + 0,01 (82 - 15) (21 - 10)$$

$$= (47) [0,2 + 0,005 (-2)] + 0,01 (67) (11)$$

$$= 8,93 + 7,37$$

$$= 16,3. \text{ Индекс группы } 16.$$

Полная классификация AASHTO этой почвы – А-6 [16].

(с) *Единая классификация*

PI = 21 и LL = 38. Используйте рисунок 3.5 (с). Почва классифицируется как CL, как показано в точке «b». CL означает, что почва представляет собой глину с низкой пластичностью, это неорганическая глина, гравийная глина, песчаная глина, илистая глина или тощая глина.

Система классификации почв USDA и идентификация и классификация загрязненных почв тесно связаны с экологической геотехнологией, поэтому дальнейшие обсуждения этих двух методов представлены в разделах 3.5 и 3.7.

3.5. СИСТЕМА КЛАССИФИКАЦИИ ПОЧВЫ USDA

3.5.1. Общее обсуждение

Система классификации почвы Министерства сельского хозяйства США была разработана российскими сельскохозяйственными инженерами в 1870 году, чтобы обеспечить возможность тщательного изучения почв с такими же сельскохозяйственными характеристиками. Около 1900 года эта система была принята Министерством сельского хозяйства США. Инженеры дорожного движения обнаружили, что эта система и полученная ценная информация о почве могут быть использованы при идентификации почв (HRB, 1957). Однако эту систему можно использовать только в качестве предварительного шага при исследовании почвы, поскольку инженерные свойства почвы должны быть определены после идентификации.

3.5.2. Классы почв: зональные, интразональные и аazonальные

В системе USDA почвы подразделяются на три основных класса: зональные, интразональные и аazonальные – в зависимости от количества разработанного профиля.

1. Зональные почвы – это зрелые почвы, характеризующиеся хорошо дифференцированными горизонтами и профилями. Они встречаются там, где земля хорошо осушена, но не слишком крута.

2. Интразональные почвы – это почвы с хорошо развитыми характеристиками, обусловленными влиянием некоторых местных факторов окружающей среды. Болотные, торфяные (раздел 13.5) и солончаково-щелочные почвы (раздел 13.11) являются типичными примерами.

3. Аazonальные почвы относительно молоды и в минимальной степени отражают воздействие окружающей среды. Они не имеют профильного развития и структуры, развитой из почвообразующих процессов. Аллювиальные почвы пойм и сухих песков вдоль крупных озер являются типичными примерами.

3.5.3. Большие почвенные группы и почвенные серии

3.5.3.1. Большая почвенная группа

Система USDA подразделяется на подзаказы, как обсуждалось в предыдущем разделе, а затем дополнительно подразделяется на большие группы почв на основе совокупного воздействия климата, биологических факторов и топографии. Thorp и Smith (1949), основываясь на системе Marbut (USDA, 1938), разработали классификацию почв в более высоких категориях, как показано в таблице 3.7. Существенными признаками для определения единицы почвы являются: (а) численный показатель, (б) цвет, (с) текстура, (d) структура, (е) толщина, (f) химический и минеральный состав, (g) относительное расположение различных горизонтов и (h) геология исходного материала.

3.5.3.2. Серия почв

Почвы в каждой большой группе почв делятся на ряды почв. Почвенный ряд включает все почвы, которые имеют одинаковые признаки:

- 1) родительский материал:
 - а) твердую породу (магматическую, осадочную, метаморфическую);
 - б) рыхлую породу (гравий, пески, глины, другие отложения);
- 2) особенности исходного материала: остаточный материал или материал, транспортированный ветром, водой, льдом и т. д. (возможны комбинации);
- 3) топографическую позицию: от грубой до депрессивной;
- 4) естественный дренаж: чрезмерный к плохому;
- 5) характеристики профиля.

Различные серии обычно имеют географические названия, указывающие место, где они были впервые распознаны и описаны (например, Sassafras, Putnam, Cecil, Hagerstown и т. д.). Например, Hagerstown – это название города в штате Нью-Джерси, где почва хейгерстаун была впервые обнаружена и описана. Дальнейшие обсуждения морфологии, генезиса и классификации почв представлены в работе Fanning и Fanning (1989).

Таблица 3.7. Классификация почв в высших категориях

Класс	Подотряд	Большая группа почв
Зональные почвы	1. Почвы холодной зоны	Тундровые почвы
	2. Светлые почвы засушливых районов	Пустынные почвы Красные пустынные почвы Сероземы Коричневые почвы Красновато-коричневые почвы
	3. Почвы темного цвета полузасушливых, субгумидных и влажных лугов.	Каштановые почвы Красновато-каштановые почвы Черноземные почвы Степные почвы Красноватые прерийные почвы
	4. Почвы лесолугового перехода	Ухудшенный чернозем Некальциевые коричневые или шантунские коричневые почвы
	5. Светлые подзолистые почвы лесных массивов	Подзолистые почвы Серые лесистые или серые подзолистые почвы ¹ Коричневые подзолистые почвы Серо-коричневые подзолистые почвы Красно-желтые подзолистые почвы ¹
	6. Латеритные почвы лесных высокотемпературных и тропических регионов	Красновато-коричневые ¹ латеритные почвы Желтовато-коричневые латеритовые почвы Латеритные почвы ¹
Интразональные почвы	1. Галоморфные (засоленные и щелочные) почвы не полностью дренированных засушливых районов и литоральных отложений	Солончак или засоленные почвы Солонечки почвы Солодь
	2. Гидроморфные почвы болот, мест просачивания и равнин	Гумино-глинистые почвы (включая Визенбоден) ¹ Альпийские луговые почвы Болотные почвы Полуболотные почвы Низкогумино-глиевые почвы ¹ Подзолистые почвы грунтовых вод Латеритные почвы грунтовых вод
Азональные почвы	3. Кальциморфные почвы	Бурые лесные почвы (Браунерде) Рендзина почвы Регосоль (включая сухие пески) Аллювиальные почвы

¹ Новые или недавно модифицированные большие группы почв.

Источник: по Thorp, J. and Smith, G. D. (1949), *Soil Sci.*, v. 67, pp. 117–126.

3.5.4. Таксономия почвы

В 1951 году, когда была начата таксономия почв, в США было признано около 5500 почвенных рядов. Таксономия почв должна была стать логической, четко определенной системой классификации. Это комплексная система классификации почв, которая постоянно обновляется вплоть до настоящего времени. В 1965 году Министерство сельского хозяйства США приняло то, что тогда было известно как седьмое приближение, в качестве своей системы классификации почв. Чтобы

узнать больше о таксономии почвы для инженерных применений см. SMSS (1990) и PCA (1992).

3.6. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПРИРОДНОЙ ПОЧВЫ И ГЛИНОВОЙ ФРАКЦИИ

3.6.1. Общее обсуждение

Учитывая большую изменчивость химического состава исходных материалов, из которых формируются почвы, можно ожидать столь же большую изменчивость в составе почвы. Наиболее общая химическая классификация почв была сделана Марбутом (1920) путем разделения почв на два класса, а именно:

1) *педальферы*: почвы влажного климата (осадки > испарение), следовательно, наблюдается перколяция и отвод воды, что приводит к относительной концентрации соединений железа (Fe) и алюминия (Al) в одном из профилей или горизонтов;

2) *педокалы*: почвы в полувлажном и засушливом климате (осадки < испарение), с повышенной концентрацией CaCO_3 внутри или на поверхности профиля почвы.

Существенные различия в цвете существуют не только между различными почвами, но также и между различными горизонтами одной и той же почвы. Цвет может быть унаследован от исходного материала, он может зависеть от химических продуктов выветривания, их дифференцированная передача в разные горизонты приводит к различиям в цвете, это может быть связано с органическим веществом в различных количествах и степени гумификации (Stevenson, 1986), а также может быть связано с условиями поверхностного или подземного дренажа.

3.6.2. Общая химия почвы

Химия почвы включает в себя много очень разных химических соединений. Наиболее важная группа состоит из соединений элемента кремния, которые составляют более 75 % различных слоев почвы. Соединения кремния в почве образуются в результате разложения всех видов силикатных пород на поверхности земли. В таблице 3.8 представлен примерный химический состав земной коры и А- и В-горизонтов профиля почвы, согласно данным Министерства сельского хозяйства США (Yuers и соавторы, 1938b). Аналогичные результаты также черпаются из других источников (NISS, 1978). Однако они указывают на то, что в различных почвенных профилях и горизонтах существуют более разнообразные химические составы. Средние составы земной коры и А- и В-горизонтов почв, выраженные в процентах по массе, молям и ионным объемам основных составляющих элементов, представлены в таблице 3.9. Указано, что минералы в земной коре, а особенно в почвенных слоях, по существу представляют собой структуры ионов кислорода, удерживаемые вместе более мелкими катионами. Дальнейшее обсуждение ионного и электрического строения минералов почвы представлено в разделе 4.2.

3.6.3. Органическое вещество почвы

Органическое вещество почвы представляет собой смесь многих различных соединений, наиболее важными из которых являются углеводы, белки, жиры и смолы. Абсолютные количества и относительные пропорции этих соединений варьируются в зависимости от климата и макро- и микробиологической активности в почве. Органическое вещество концентрируется в поверхностных слоях и уменьшается с увеличением глубины в почве. Оно варьируется от менее 1 % в неорганических твердых веществах и песках до почти 100 % твердых веществ в торфяниках.

В полужасушливых черноземных почвах органическое вещество может составлять до 10 % от веса сухой почвы. Среднее содержание углерода в гумусе составляет 56 %. Среднее отношение углерода к азоту (отношение C/N) составляет 10:1 (Lyon и Buckman, 1939). Следовательно, значение 10 % органического вещества соответствует 5,6 % углерода и 0,56 % азота. Было обнаружено, что латеритовые почвы влажных тропиков, несмотря на их часто блестящий красный и желтый неорганический внешний вид, содержат до 2 % и более органического вещества.

Таблица 3.8. Приблизительный химический состав земной коры и А- и В-горизонтов

Состав	Земная кора (%)	А-горизонт (%)	В-горизонт (%)
Оксид алюминия (Al_2O_3)	15,34	9,97	11,77
Оксид железа (Fe_2O_3)	6,26	3,59	5,74
Оксид кальция (CaO)	4,96	1,04	1,01
Оксид магния (MgO)	3,90	0,60	0,85
Оксид калия (K_2O)	3,06	1,73	2,06
Оксид натрия (Na_2O_3)	3,44	0,82	0,83
Оксид марганца (MnO)	0,10	0,14	0,14
Оксид титана (TiO_2)	0,78	0,90	0,90
Оксид фосфора (PO)	0,29	0,14	0,14
Оксид серы (SO_2)	0,25	0,09	0,09
Оксид кремния (SiO_2)	61,28	76,46	76,46

Источник: по Byers, H. G., Anderson, M. S. and Bradfield, R. (1938b), Soils and Men, Yearbook of Agriculture, U.S. Department of Agriculture, pp. 911–928. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в свободном доступе и не подлежит защите авторских прав.

Таблица 3.9. Средний элементарный состав земной коры и А- и В-горизонтов почв

Элемент	Земная кора			Горизонты почвы (% по весу)	
	Вес	(моль %)	Ионный объем	А	В
O ¹	48,18	63,40	94,00	52,78	49,73
Si	28,60	21,50	0,83	35,70	35,70
Al	7,13	5,62	0,69	5,30	6,24
Fe	4,38	1,64	0,44	2,35	4,05
Ca	3,52	1,85	1,42	0,74	0,71
Mg	2,35	2,04	0,62	0,36	0,51
K	2,54	1,37	2,07	1,43	1,71
Na	2,52	2,32	1,40	0,61	0,61
Mn	0,06	0,023	0,01	0,09	0,09
Ti	0,47	0,206	0,03	0,54	0,54
P	0,13	0,088	0,001	0,06	0,06
S	0,13	0,086	0,002	0,05	0,05

¹ Процентное содержание кислорода не включает вклад от содержания свободной воды.

Источник: данные из USGS с изменениями; цит. по: Winterkorn, H. F. and Fang, H. Y. (1991), *Foundation Engineering Handbook*, 2nd ed. (1st ed. 1975). Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 88–143.

Общее количество углерода в почве представляет собой сумму, которую вносят органические вещества и неорганические карбонаты, особенно те, которые содержат Ca и Mg. Горизонты, обогащенные Mg, типичны для педокальных почв (рис. 3.3).

Глина содержит различные виды природных минералов. В большинстве глин эти минералы представляют собой монтмориллонит, иллит, каолинит, галлуазит или их комбинации. От прочности глинистой системы и ее количества зависит прочность межчастичных связей минералов. В таблице 3.10 представлен процент элементов в некоторых распространенных глинистых минералах, согласно сообщениям Бланка (1939). Типичные геотехнические свойства некоторых основных глинистых минералов представлены в таблице 4.7. Дальнейшие обсуждения ионных и электрических структур глин будут представлены в разделе 4.3.

3.6.4. Соотношение силикагеля и полуторной окиси (SSR) фракции глины

Как обсуждалось в разделе 3.4 и отмечалось в таблицах 3.10 и 3.11, большинство глинистых минералов содержат различные количества SiO₂, Al₂O₃ и Fe₂O₃. Многие из свойств глин связаны с отношением диоксида кремния и полуторной окиси (SSR) (Mattson, 1932; Winterkorn and Baver, 1934) следующим образом:

$$SSR = SiO_2 / Al_2O_3 + Fe_2O_3 \quad (3.2)$$

SSR, определенный в уравнении 3.4, является полезным параметром для идентификации и характеристики глинистых минералов. На рисунке 3.6 показано, что при увеличении значения SSR содержание глины увеличивается, что отражается в показателях активности и пластичности. Чем выше значение SSR глины, тем больше чувствительность к окружающей среде. Корреляция между значением SSR и ионообменной способностью для различных естественных почвенных отложений представлена в таблице 3.11 и рисунках 3.6 и 3.7.

Уравнение 3.2 также можно записать в виде:

$$SSR = \frac{\frac{x}{A}}{\frac{y}{B} + \frac{z}{C}} \quad (3.3)$$

где

$x = \% \text{SiO}_2$

$y = \% \text{Al}_2\text{O}_3$

$z = \% \text{Fe}_2\text{O}_3$

A = молекулярный вес SiO_2

B = молекулярный вес Al_2O_3

C = молекулярный вес Fe_2O_3

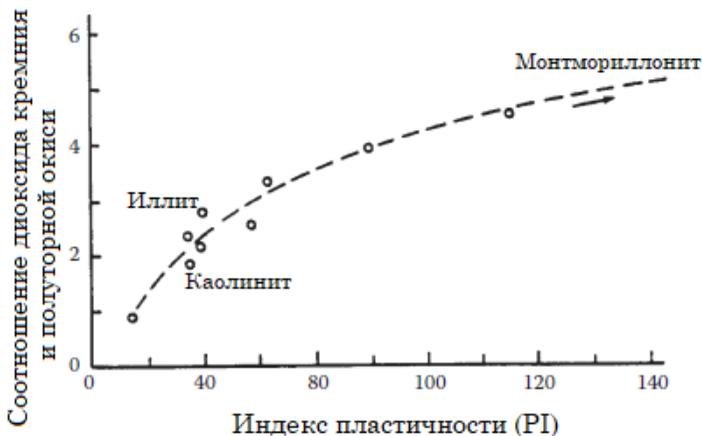
Согласно приложению 2D, атомные веса этих элементов следующие: Si = 28,1; O = 16,0; Al = 27,0; и Fe = 55,8.

Тогда молекулярный вес этих молекул можно рассчитать так:

$A = \text{SiO}_2 = (28,1) + (16,0) (2) = 60,1$

$B = \text{Al}_2\text{O}_3 = (27,0) (2) + (16,0) (3) = 102,0$

$C = \text{Fe}_2\text{O}_3 = (55,8) (2) + (16,0) (3) = 159,6$



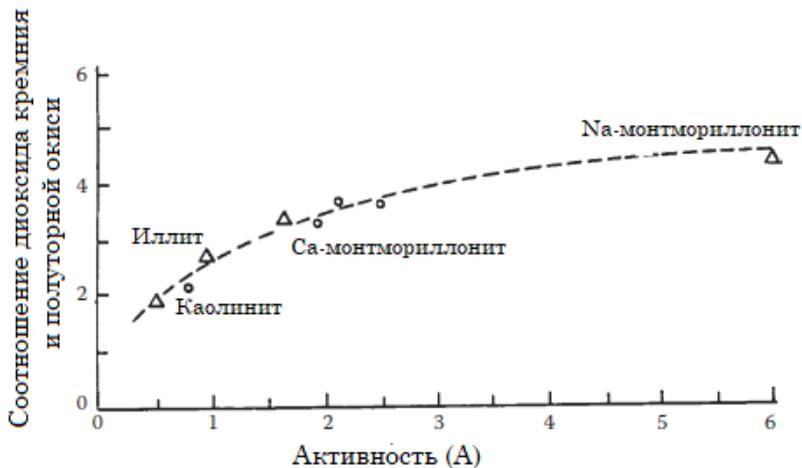


Рисунок 3.6. Соотношение кремнезема и полуторной окиси (SSR) в зависимости от индекса пластичности (PI) и активности (A) для различных типов почв и глинистых минералов.

Таблица 3.11. Соотношение ионообменной емкости, кремнезема и полуторной окиси и соотношения Si/Al(Fe) некоторых природных почв

Тип глины	Ионообменная ¹ емкость (мэкв / 100 г)	Источник	Соотношение кремнезема и полуторной окиси	Соотношение Si/Al(Fe)
С	13	Алабамский суглинок	1,3	0,65
Саскуэханна	47	Алабамские хорошо окисленные почвы	2,3	1,15
Путнам	65	Тяжелый суглинок Миссури	3,2	1,60
Уобаш	78	Алловиальная глина Миссури	3,3	1,60
Луфкин	82	Алабамский черный пояс	3,8	1,90
Монтмориллонит	95	Вайомингский бентонит	5,0	2,50

¹ Базовая обменная емкость представляла собой миллиэквиваленты катионов, адсорбированных на поверхности 100 г коллоида и способных к обмену на другие катионы, которые могут быть введены в систему.

Источник: данные взяты из: Winterkorn, H. F. and Bayer, L. D. (1934), Soil Sci., v. 38, no. 4, pp. 291–298; Winterkorn, H. F. (1955), The science of soil stabilization, HRB Bull, 108, pp. 1–24.

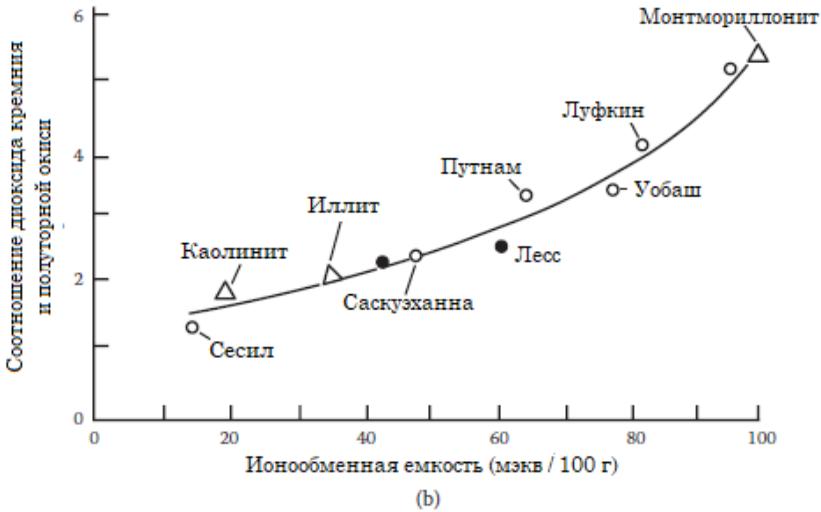
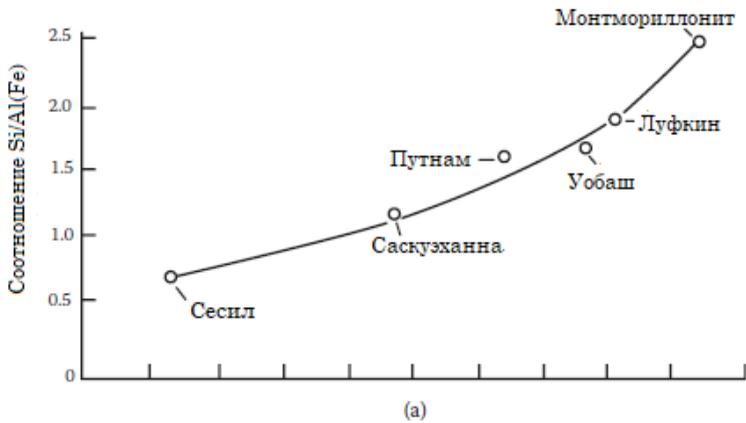


Рисунок 3.7. Свойства диоксида кремния / полуторной окиси в зависимости от ионообменной емкости для различных типов почв и глинистых минералов: (а) соотношение Si/Al в зависимости от ионообменной емкости и (b) SSR в зависимости от ионообменной емкости.

Подставим эти числовые значения в уравнение 3.3:

$$SSR = \frac{\frac{x}{60.1}}{\frac{y}{102.0} + \frac{z}{159.6}} \quad (3.4)$$

3.7. ГРАНУЛЯРНЫЕ ПОЧВЫ (ГАЛЬКА, ВАЛУН, ГРАВИЙ, ПЕСОК И ИЛ)

3.7.1. Общее обсуждение

Типы минералов почвы, представленные в различных фракциях, за исключением глин, будут обсуждаться в этом разделе. Влияние минералогического характера частиц почвы на производительность многих инженерных систем указывает на желательность краткого изложения о типах минералов почвы, которые обычно представлены в различных фракциях. Эта категория включает булыжники, валуны, гравий, пески и илы. С экологической геотехнической точки зрения, чем меньше частицы почвы, тем более они чувствительны к окружающей среде; однако все эти более мелкие частицы получены из более крупных материалов. Следовательно, происхождение и источники этих более крупных частиц почвы также важны для окружающей среды.

Таблица 3.12. Инженерная номенклатура для размерных категорий

Название	Диапазон размеров минералов или номера сита	В мм
Валуны	> 12 дюймов	> 305
Галька ¹	3–12 дюймов	76,2–305
Гравий ²	№ 4 – 3 дюйма	4,76–76,2
Грубый	¾ – 3 дюйма	19,1–76,2
Мелкий	№ 4 – ¾ дюйма	4,76–19,1
Песок	№ 4 – № 200	0,074–4,76
Грубый	№ 4 – № 10	2,0–4,76
Средний	№ 10 – № 40	0,42–2,0
Мелкий	№ 40 – № 200	0,074–0,42
Мелкие фракции грунта или илесто-глинистый материал ³	< № 200	<0,074

¹ Если камни закруглены; в противном случае это валуны или обломки камней.

² При использовании в качестве компонентов бетонов и растворов гравий называется «крупная крошка», а песок – «мелкая крошка».

³ Предыдущее различие между илом и глиной на основе размера частиц (глина < 5 или 2 мкм была исключена, поскольку поведение глины или ила в тонких материалах существенно зависит от минералогического характера).

Для понимания взаимопонимания в таблице 3.12 представлена техническая номенклатура категорий частиц минерального сырья различных размеров. Инженерный грунт может состоять только из одной размерной фракции или из любого их числа в каждой возможной пропорции. Минеральная природа булыжников, валунов и гравия, по существу, такая же, как и у их материнских пород с пленкой или слоем продуктов выветривания на их поверхности, состав и толщина которых зависят от факторов окружающей среды и времени воздействия.

3.7.2. Сводные показатели

В инженерной геотехнике часто используется термин «заполнитель», потому что он охватывает различные размеры минеральных частиц почвы, таких как щебень, песок и гравий. Кроме того, термин «агрегат» делится на два подтермина: «мелкий заполнитель» и «грубый заполнитель».

1. Мелкий заполнитель (F.A.) – это материал, который проходит через 3/8-дюймовое сито и удерживается на сите № 200 (0,074 мм).

2. Грубый заполнитель (C.A.) относится к щебню или гравию, которые остаются на сите № 4 (0,187 дюйма).

3. Строительный заполнитель определяется как любая комбинация песка, гравия и/или щебня, используемых строительной промышленностью (Huhta, 1991).

Щебень может состоять из известняка, гранита, трапока или любого другого твердого, прочного камня, который получается в результате взрыва, а затем дробления. Щебень просеивается до определенного размера для указанных целей. По данным Бюро горных работ США (Terpodei, 1990), в 1989 году в США было произведено 1,2 миллиарда тонн заполнителя, который составляет щебень. Из этого количества примерно 68 % составляют известняк, 14,5 % гранит, 8,3 % базальт, 3 % доломит, 2,3% песчаник и кварцит, а остальное состоит из различных пород, таких как мергель, ракушечник и сланец.

3.7.3. Песок и гравий

Песок и гравий встречаются в природных месторождениях. Большинство песчано-гравийных отложений образуются в результате осаждения в воде и обнаруживаются вдоль русел рек. Они могут представлять собой просто механически измельченные исходные горные породы или могут представлять механически и химически наиболее стойкие минеральные составляющие материнской породы. Степень механического и химического разрушения зависит от условий окружающей среды и продолжительности воздействия на них.

Флювиальные гравий и пески становятся более кварцитовыми, чем дольше путь транспортировки. Во влажном климате гравий и песок имеют тенденцию быть кремнеземными и кварцитовыми, но они могут быть любым типом минерала в сухом климате. Белые пески Нью-Мексико представляют собой гипсовые, коралловые и ракушечные песчаные пески и могут состоять почти исключительно из CaCO_3 . Песчаные пляжи вдоль атлантического побережья меняются от штата Мэн до Флориды от по существу кварцитовых до преимущественно кальцитовых, а черный песок парка Йеллоустоун и некоторых синих и пурпурных пляжей тихоокеанских островов состоит из обсидианита или подобных стекол. Однако эти пески становятся белее и кварцитнее, чем меньше расстояние от линии низкого уровня воды, то есть чем интенсивнее процесс выщелачивания. «Тонуший» пляж в Лос-Анджелесе содержит больше неответренных полевых шпатов, чем старые стабильные пляжи той же широты. Доломитовые пески встречаются в баварской Юре и в других местах. Частицы размером с песок и гравий, используемые инженерами, также могут быть синтетическими

педогенными продуктами, такими как пизолиты в латеритных почвах (раздел 13.9). В таблице 3.13 представлена процентная доля частиц песчаной размерности в песке, суглинистом песке и супеси.

3.7.4. Ил (0,002–0,02 мм)

Фракции ила в почве могут быть практически неизменными, механически измельченными минералами, как в мелкозернистом леднике, или могут попадать в широкий спектр продуктов выветривания, в зависимости от условий окружающей среды и времени воздействия. Они также могут быть продуктами синтеза или химической флокуляции более тонко подразделенных исходных продуктов выветривания. В умеренном климате илы обычно имеют тесную связь с минералами материнской породы, такими как полевые шпаты, слюда, мусковит и кварц.

Химический состав ила приведен в таблицах 3.14 и 3.15. Таблица 3.14 показывает, что элементарный состав основных глинистых минералов очень похож на состав ила. Таблица 3.15 показывает сравнение процентного содержания доминирующих элементов глины, ила и песка. Указано, что содержание кислорода (O), алюминия (Al) и железа (Fe) как в песке, так и в иле одинаково, за исключением содержания кремния (Si). Однако следует отметить, что для специальных песков (пустынных, коралловых, ракушечных и других песчаных пляжей) химический состав должен устанавливаться индивидуально.

3.8. ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ

3.8.1. Общее обсуждение

Для проектирования, строительства и обслуживания опасных и токсичных средств контроля или использования заброшенных свалок в качестве строительных площадок для дорог, парков отдыха и т. д., необходимо знать состояние этих площадок. Идентификация и характеристика почвенного покрова на участке (-ах) является одной из предпосылок, необходимых для более полного понимания взаимодействия почва и загрязнителя в окружающей среде. Следующие методы, включая визуальную идентификацию, характеристику и классификацию загрязненной почвы для инженерных целей, предложил Fang (1993).

Таблица 3.13. Процент частиц песчаной размерности в подклассах песка, суглинистого песка и супеси

Основной класс почвы	Подкласс	Процент элементарного состава				
		Очень крупный песок, 1,0–2,0 мм	Крупнозернистый песок, 0,5–1,0 мм	Средний песок, 0,25–0,5мм	Мелкий песок, 0,1–0,25 мм	Очень мелкий песок, 0,05–0,1 мм
Пески	Крупнозернистый песок	25 % или более		Менее 50 %	Менее 50 %	Менее 50 %
	Песок		25 % или более		Менее 50 %	Менее 50 %
	Мелкий песок	Менее 25 %			50 % или более	Менее 50 %
	Очень мелкий песок					50 % или более
Суглинистые пески	Суглинистый крупнозернистый песок	25 % или более		Менее 50 %	Менее 50 %	Менее 50 %
	Суглинистый песок		25 % или более		Менее 50 %	Менее 50 %
	Мелкий суглинистый песок		Менее 25 %		50 % и более	Менее 50 %
	Очень мелкий суглинистый песок					50 % или больше
Супеси	Грубый песчаный суглинок	25 % или более		Менее 50 %	Менее 50 %	Менее 50 %
	Супесь	Менее 25 %	30 % и более		Менее 30 %	Менее 30 %
	Мелкая супесь		Между 15 и 30 %		30 % и более	Менее 30 %
	Очень мелкая супесь	Менее 15 %			Менее 40 % ¹	

¹ Половина мелкого песка и очень мелкого песка должна быть очень мелким песком.

Источник: по USDA (1938), Soils and Men, Yearbook of Agriculture, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.; PCA (1992), PCA Soil Primer, Portland Cement Association, Skokie, IL, 40p.

Таблица 3.14. Элементный состав некоторых глинистых минералов, состав которых очень похож на состав ила

Минерал	Формула	Процент элементарного состава						
		O	Si	Al	K	Na	H	F
Ортоклаз	$KAlSi_3O_8$	41.5	33.0	10.4	15.0	0	0	0
Альбит	$NaAlSi_3O_8$	44.3	35.0	11.1	0	9.5	0	0
Мусковит	$(OH,F)_2KAl_2(Si_3AlO_{10})$	44.0	21.0	20.2	9.8	0	0.24	4.7
Кварц	SiO_2	53.2	46.8	0	0	0	0	0

Таблица 3.15. Средний элементарный состав фракций почв разного размера

Доминирующие элементы	Процент доминирующих элементов		
	В глине	В иле	В песке ¹
O	50–57	41–53	41–53
Si	15–25	21–47	41–53
Al	20–21	0–20	0–20
Fe	0–30	0–5	0–5

¹ Для специальных песков (пустынных, коралловых, ракушечных и других пляжных песков) химический состав должен быть определен индивидуально.

Источник: данные из: Winterkorn, H. F. (1955), *The science of soil stabilization*, HRB Bull, 108, pp. 1–24.

3.8.2. Визуальная идентификация загрязненных почв

Во время разведки и полевых исследований на участке(-ах) опасных и токсичных отходов должны соблюдаться правила и учитываться определенные данные, такие как:

- 1) характеристика места:
 - а) количество и состояние заброшенных зданий;
 - б) состояние дорог в прилегающих районах;
- 2) характеристики грунта и вод:
 - а) цвет и запах почв и вод;
 - б) особенности эрозии почвы (раздел 14.5);
 - с) схемы растрескивания грунта (раздел 6.5);
- 3) состояние рек и ручьев:
 - а) скорости потока поверхностных вод;
 - б) цвет и запах вод;
 - с) водяные пузыри и температура воды.

3.8.3. Цвет грунта и воды

3.8.3.1. Цвет грунта

Существенные различия в цвете существуют не только между различными почвенными горизонтами одной и той же почвы. Цвет может быть унаследован от исходного материала или же зависеть от химических продуктов выветривания, органических веществ и степени увлажнения. Во многих случаях, когда система почва–вода загрязнена, она также производит различные цвета. Различают однородные, пятнистые и полосатые окрасы, каждый из которых имеет физическое или химическое значение. Для описания цвета необходимо использовать колориметрическую систему Манселла. Она принимает во внимание:

- 1) оттенок – доминантный спектральный (радужный) цвет;
- 2) соотношение относительной яркости цвета (приблизительно квадратный корень от общего количества света);
- 3) относительную хроматическую чистоту спектрального цвета.

В таблице 3.16 приведены характеристики почвы, связанные с ее цветом в нормальных условиях окружающей среды. Однако, если почва сильно загрязнена, эти цвета снова изменятся. В большинстве случаев эти цвета блестящие с некоторым количеством оттенков. Дальнейшее обсуждение этого аспекта представлено в разделе 6.6.

Таблица 3.16. Характеристики почвы, связанные с ее цветом

Цвета почвы	Характеристики почвы
Черно-темно-серые	Большинство органических почв ¹
Красный цвет	Из-за присутствия негидратированного гематита или кровавого камня
Желтые и коричневые цвета	Указывают на хороший дренаж и аэрацию
Серые цвета	Восстановленные или двухвалентные соединения железа указывают на плохой дренаж и анаэробные условия
Пестрая железная окраска	Показывает ограниченную проницаемость и аэрацию
Черный и темно-коричневый цвета	Показывают характеристики органических веществ, за исключением редких случаев, когда цвета обусловлены марганцем (Mn), титаном (Ti) и другими минералами темного цвета
Белый цвет	Может быть обусловлен преобладанием кремнезема, извести, гипса и относительно чистых отложений глины, таких как каолинит

¹ В тропических почвах темный цвет может быть из-за органического вещества; если причина не в органическом веществе, то это связано с плохим дренажом. Сухие неорганические глины при увлажнении приобретают землистый запах, который отличается от разлагающегося органического вещества.

Источник: данные из: Winterkorn, H. F. and Fang, H. Y. (1991), *Foundation Engineering Handbook*, 2nd ed. (1st ed. 1975). Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 88–143; и другие.

3.8.3.2. Цвет воды и характеристики водяных пузырей

Водяные пузыри образуются некоторыми загрязненными водами из-за различий диэлектрических постоянных и их поверхностного натяжения. Туповидные желтоватые пузырьки в медленно движущихся областях указывают, где вода загрязнена. Следовательно, такие показатели, как количество, цвет и размер пузырьков, плавающих на поверхности воды, также могут использоваться для определения степени загрязнения поверхностных вод, а также могут косвенно использоваться для прогнозирования степени загрязнения грунта.

3.8.4. Запахи в окружающей среде

3.8.4.1. Общее обсуждение

Запах природных газов также может помочь идентифицировать или охарактеризовать загрязнение почвы и воды. С другой стороны, некоторые сильно ядовитые газы, существующие в природе или образованные в качестве побочного продукта производства, не имеют цвета и запаха; это монооксид углерода (CO), метан (CH₄) и газ радон (Rn-222).

Следовательно, один запах не может быть использован для идентификации или классификации загрязненных систем воздух–вода–грунт. Однако, если имеется дополнительная информация о происхождении или источниках запаха, информация об этом запахе является ценной для целей идентификации. Некоторые опасные и токсичные природные газы или побочные продукты кратко

представлены следующим образом и используются в качестве дополнительной информации для идентификации загрязненных почвенно-водных систем.

3.8.4.2. Запах природных или побочных газов

1. Аммиак (NH_3) – бесцветный газ с сильным запахом. Растворим в воде и образует водные растворы. Аммиак используется для производства удобрений, лекарств, взрывчатых веществ, синтетических волокон и пластмасс. Он также используется в процессах окрашивания, дубления, изготовления бумаги и гальваники.

2. Окись углерода (CO) – бесцветный, сильно ядовитый газ без запаха. Часто образуется при неполном сгорании.

3. Хлор (Cl_2) является сильно ядовитым газом. Имеет зелено-желтый цвет и раздражающий запах. Хлор используется во многих промышленных производствах, например на производстве бумаги, текстиля, красителей, пластмасс, инсектицидов и лекарств, а также для уничтожения бактерий в воде, чтобы сделать ее безопасным для питья.

4. Хлористый водород (HCl) – бесцветный газ с резким запахом. Он смешивается с водой, образуя соляную кислоту, и используется в производстве хлористого металла, клеев, красителей и различных других химических веществ. Он также используется в гальванических процессах и производстве стали.

5. Сероводород (H_2S) – бесцветный, очень ядовитый газ, имеющий неприятный запах, похожий на запах тухлых яиц. Он производится в больших количествах в результате анаэробного разложения органического вещества в прибрежных поймах и заболоченных районах (разделы 13.5 и 14.1).

6. Метан (CH_4) – это бесцветный газ без запаха, образующийся при разложении органического вещества, который в больших количествах содержится на свалках.

7. Диоксид азота (NO_2) является сильно ядовитым красно-коричневым газом с раздражающим запахом. Он образуется при соединении газообразного оксида азота (NO) с газообразным кислородом (O_2).

8. Диоксид серы (SO_2) – бесцветный ядовитый газ с удушающим запахом. Он используется в производстве бумаги и отбеливателя для бумаги, текстиля и муки. Важным применением является производство триоксида серы (SO_3), который используется при производстве серной кислоты (H_2SO_4).

3.8.4.3. Запах почвы и воды

Свежие влажные органические почвы обычно имеют характерный запах разлагающегося органического вещества. Этот запах можно сделать более заметным при нагревании влажного образца. Запах также может быть использован для выявления многих естественных газов или загрязненных веществ, задержанных в пустотах почвы. Если почва загрязнена нефтяным маслом, ее можно легко определить по запаху. Проверка воды на запах была стандартизирована ASTM (D1292-80), как показано в таблице 3.17.

3.8.5. Модели растрескивания почв

Трещины и цвет почвы тесно связаны. Трещины возникают при загрязнении системы почва–вода, особенно при загрязнении органическими кислотами, такими как уксусная кислота ($C_2H_4O_2$), анилин ($C_6H_5NH_2$) и четыреххлористый углерод (CCl_4). Наблюдаются существенные различия в характере растрескивания грунта между незагрязненными и загрязненными образцами почвы. Таким образом, схемы растрескивания поверхности земли являются полезным инструментом для оценки загрязненной почвы. Для дальнейшего обсуждения этого аспекта см. раздел 6.6.

3.8.6. Свойства, используемые для характеристики загрязненной почвы

Почти все геотехнические инженерные классификации, такие как AASHTO, Unified, FAA, USGS и т. д., основаны на гранулометрическом составе твердых компонентов в их взаимодействии с водным веществом. Поскольку во взаимодействии почвы и воды преобладает общее количество поверхности, присутствующей в образце, отношение поверхности к объему (удельная поверхность) увеличивается с уменьшением размера частиц. Эти взаимодействия и сопутствующие изменения консистенции обычно определяются кривой распределения зерен по размерам. Поскольку почва чувствительна к местной окружающей среде, необходимо учитывать некоторые дополнительные параметры, такие как удельная поверхность, pH в поровой жидкости, соотношение диоксида кремния и полуторной окиси (SSR), сорбция, диэлектрическая проницаемость и т. д. Некоторые из этих параметров кратко обсуждаются далее, в частности:

- 1) соотношение диоксида кремния и полуторной окиси в разделе 3.6.4;
- 2) сорбционные (абсорбционные + адсорбционные) характеристики почвы в разделе 6.4;
- 3) удельная поверхность почвы (удельная поверхность почвы – это площадь поверхности на единицу объема твердого тела; это функция размера частиц; соответственно, чем меньше частицы почвы, тем больше количество поверхности на единицу объема, при которой может происходить взаимодействие почвы с водой);
- 4) диэлектрическая проницаемость в разделе 9.7.

Таблица 3.17. Запах классифицируется по химическим типам

Характеристики запаха ¹				Класс запаха	Химич. тип	Пример
Сладость	Острота	Дымность	Гнилость			
100	50	0–50	50	Эфирный	Эфиры Нижние кетоны	Лак, растворители, большинство фруктов, много цветов
100	50–100	0–100	50	Алкогольный	Фенолы и крезолы Спирты Углеводороды	Креозот, гудроны, дым, алкоголь, ликер, роза и пряные цветы, специи и травы
50	50	0–50	50	Карбонильный	Альдегиды Высшие кетоны	Жиры, сливочное масло, косточковые фрукты и орехи, фиалки, травы и овощи
50	100	0–50	50	Кислый	Кислотные ангидриды Органические кислоты Диоксид серы	Уксус, пот, прогорклое масло, смолы, запах тела, мусор
100	50–100	50–100	0–100	Галидный	Хиноны Оксиды и озон Галогениды Азотные соединения	Инсектициды, средства от сорняков, затхлый и плесневелый запах, шелуха, лекарственные запахи, земля, торф
50	50	100	100	Серный	Селеновые соединения Соединения мышьяка, меркаптанов Сульфиды	Скунсы, медведи, лисы, гниющие рыба и мясо, капуста, лук, сточные воды
100	50	50	100	Ненасыщенный	Производные ацетилена Бутадиен Изопрен	Разбавители, лак, керосин, скипидар, эфирные масла, огурец
100	50	0–50	100	Основной	Виниловые мономеры Амины Алкалоиды Аммоний	Фекальные запахи, навоз, рыба и моллюски, несвежие цветы, такие как сирень, лилия, жасмин и жимолость

¹ Степень восприятия запахов обозначается следующим образом:

- 100 указывает на высокий уровень восприятия;
- 50 указывает на средний уровень восприятия;
- 0 указывает на низкий уровень восприятия.

3.9. КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ

3.9.1. Основная концепция

Основная концепция классификации загрязненных почв зависит от размера частиц почвы. Размер частиц сферической и кубической формы составляет $3/r$ и $6/d$ соответственно, в которых r = радиус сферы, а d = длина ребра куба. Значения

для количества поверхности в сантиметровом квадрате на единицу твердого объема в кубическом сантиметре приведены в таблице 3.18 для типичных размеров почвы.

Таблица 3.18. Классификация загрязненной почвы по индексу чувствительности к загрязнению (PSI) и площади поверхности частиц почвы

PSI	Тип почвы	Размер (см)	Площадь поверхности (см ² /см ³)	Чувствительность
0–2	Гравий	0,2–8,0	15–0,125	Очень низкая
2–4	Песок	0,005–0,2	15–600	Низкая
4–6	Ил	0,0005–0,005	600–6000	Средняя
6–8	Глина	0,0001–0,0005	6000–30000	Высокая
8–10	Коллоиды	< 0,0001	> 30000	Очень высокая

Источник: по Fang, H. Y. (1987), 1st Int. Symp. on Environmental Geotechnology, v. 2, D.1 and D.3, Envo Publ. Co., Bethlehem, PA., pp. 290, 297, 310, 340; Fang, H. Y. (1993), Proc. Int. Conf. on Environment and Geotechnics, Paris, April, 8 p.

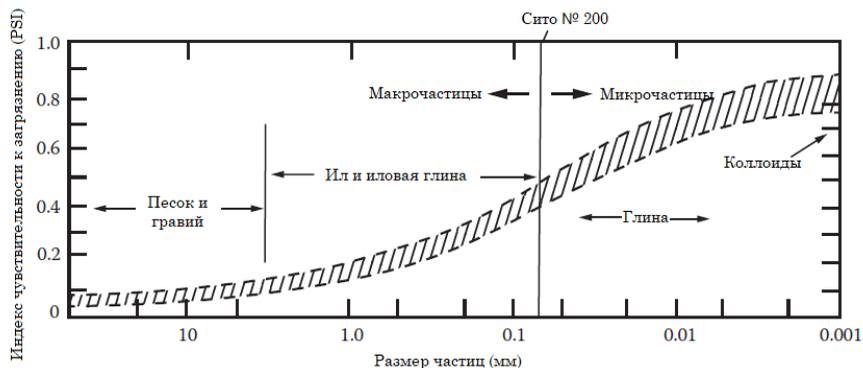


Рисунок 3.8. Индекс чувствительности к загрязнению (PSI), относящийся к размеру частиц почвы (по Fang, H. Y. [1987], Discussions, 1st Int. Symp. on Environmental Geotechnology, v. 2, D.1 and D.3, Envo Publ. Co., Bethlehem, PA, pp. 290, 297, 310, 340. Reprinted with permission of Envo Publishing, Bethlehem, PA).

Если глина и коллоиды присутствуют в почве даже в небольших процентах, они могут составлять подавляющую часть всей твердой поверхности. Тип и интенсивность взаимодействия между почвой и поровой жидкостью зависят от химического состава и физико-химических свойств поверхностей частиц.

3.9.2. Чувствительность почвы к окружающей среде

Чувствительность почвы к окружающей среде не только зависит от местной окружающей среды, но также зависит от естественно наследуемой минеральной структуры, например от характеристики связи между частицами (раздел 4.5), ионообменной емкости и т. д. Чем слабее энергия связи между частиц или чем выше ионообменная емкость, тем выше чувствительность частиц к окружающей среде. Например, монтмориллонит потенциально более чувствителен к окружающей среде, чем иллит и каолинит, потому что группа монтмориллонита имеет большую площадь поверхности, более слабую энергию связи и более высокую ионообменную емкость.

3.9.3. Индекс чувствительности к загрязнению (PSI)

На рисунке 3.8 показана взаимосвязь между индексом чувствительности к загрязнению (PSI) и размером частиц, как это предложил Fang (1987). По мере уменьшения размера частиц повышается чувствительность к загрязнению. В таблице 3.18 предлагается простая система классификации загрязненной почвы. Эта таблица подготовлена на основе размеров частиц почвы и площади поверхности.

При рассмотрении таблицы 3.18 указывается, что, когда содержание глины увеличивается, потенциал чувствительности к загрязнению также значительно увеличивается. Тем не менее содержащаяся в нем информация должна использоваться с осторожностью из-за возможных модификаций или противодействующих эффектов из-за ранее упомянутых естественно унаследованных характеристик структуры минералов.

3.10. ПЫЛЬ – МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ОБЛОМКИ

3.10.1. Общее обсуждение

Чешуйку, плавающую в воздухе или на поверхности воды, мы обычно называем пылью; мы также называем это микроскопическим мусором. Пыль является одним из наиболее важных элементов, относящихся к нашей повседневной среде наряду с воздухом и водой. Пыль не так проста, как мы думали. Она действует как «посредник», храня бактерии, пыльцу, пепел и мелкие частицы почвы и транспортируя их. Таким образом, нежелательные загрязняющие вещества могут переноситься из одного места в другое.

Первый научный подход к анализу пыли был предпринят французским микроскопистом Эдмондом Локаром в 1930 году. Затем Rhodes (1931) проанализировал пыль как ключ к преступным действиям. Позже пыль использовалась археологами (Deetz, 1967; Shackley, 1981); когда фрагменты в пыли анализируются, они дают ценные ключи к существованию и поведению людей, которые жили раньше. Идентификация и характеристика частиц пыли, связанной с судебным-медицинским расследованием или открытием доисторической культуры, имеют много сходств, не последним из которых

является использование микроскопии. На самом деле идентификация частиц пыли с помощью микроскопии не ограничивается криминальной средой, на что указывает Bisbing (1989). Пыль – это мост, связывающий различные загрязнители с окружающей средой, и дальнейшее обсуждение будет представлено в разделе 10.7.

3.10.2. Характеристики пыли

Пыль обладает отличительными характеристиками: она образуется в результате распада различных материалов, а состав частиц пыли довольно разнообразен и сложен. Некоторые принимают форму настоящих жидких аэрозолей и выглядят как туманы. Некоторые принимают форму твердого дыма и летучей золы. С другой стороны, частицы могут представлять собой конгломерат твердых и жидких веществ. Обнаружено, что частицы содержат различные вещества, такие как Al^{3+} , Ca^{2+} , Fe^{2+} , Pb^{2+} , Mg^{2+} и Na^+ в комбинации с нитрат-ионами (NO_3^-), сульфат-ионами (S^{2-}) и хлорид-ионами (Cl^-). Некоторые из них содержат органические соединения, такие как серная кислота (H_2SO_4) и азотная кислота (HNO_3). Большая часть свинца (Pb) в частицах загрязняющих веществ поступает из присадок к свинцово-алкильным топливам (Dickson, 1974). Некоторые частицы поглощают газообразные загрязнения из загрязненного воздуха, например газ радон ($Rn-222$).

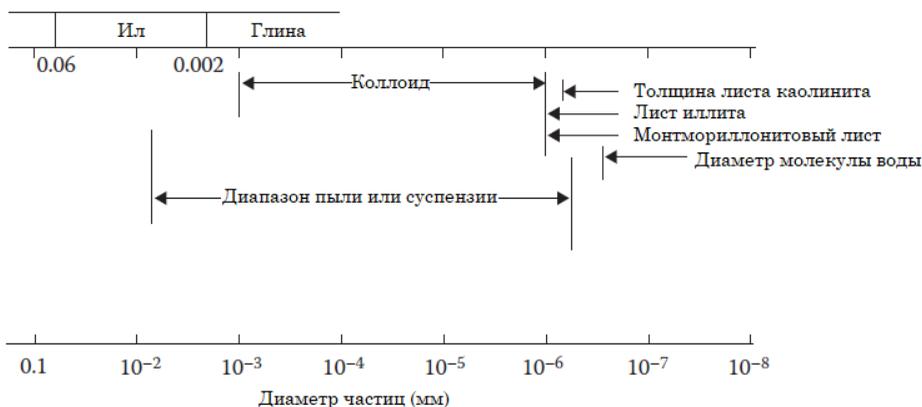


Рисунок 3.9. Сравнение размеров частиц пыли или суспензии и других глинистых минералов и элементов

Таблица 3.19. Классификация пыли на основе состояния вещества и окружающей среды

Состояние материи	Уличная пыль	Домашняя пыль
Жидкость	Туман, химические пары	Пар от готовки и из ванной комнаты
Твердое вещество	Цветочная пыльца Копать Очень мелкий ил (например, лесс) Летучая зола Строительный мусор	Пыльца (сенная лихорадка) Косметическая пудра Отслаивающаяся краска Сухая труха Паутина Мертвые насекомые Волосы человека или животных Пепел от сигары или сигареты Зола и сажа из камина и дровяных печей Линт (тканевые волокна) Перхоть (сухие чешуйки кожи)
Твердые–жидкие композиты	Конгломерация твердых веществ и жидкостей, таких как смог	Влажная пыль в неотапливаемом подвальном углу Пыль вокруг ванной или на кухне Пыль в комнате с высокой влажностью Освежитель воздуха

3.10.3. Пыль в окружающей среде

Твердую частицу, которая парит в воздухе, называют пылью, а которая плавает в воде, называют суспензией. На рисунке 3.9 представлено сравнение размера частиц пылевидной суспензии и других глинистых минералов и элементов, обычно используемых в геотехнической инженерии. В таблице 3.19 представлена классификация пыли на основе состояния вещества и окружающей среды.

3.11. СУСПЕНЗИЯ: ПЫЛЬ В ВОДЕ

3.11.1. Характеристики суспензии

Когда пыль попадает в воду, она называется суспензией, как указано в предыдущем разделе. Суспензия – это свободный термин; она определяется как вещество, диспергированное в другом веществе в форме, в которой дисперсные частицы больше, чем коллоидные частицы ($> 1000 \text{ \AA}$). Эта дисперсия называется суспензией. Система суспензии состоит из двух фаз, одна из которых рассредоточена по другой. Дисперсная фаза представляет собой прерывистую фазу, а дисперсионная среда представляет собой непрерывную фазу. Обычный диапазон размеров диспергированных частиц составляет от 1 до 1000 мкм. Если частицы больше 1000 мкм, система представляет собой грубую суспензию. Если частицы меньше 1 мкм, система является истинной эмульсией. Взаимодействие между суспензией, раствором и коллоидным состоянием будет дополнительно обсуждаться в разделе 4.9.

3.11.2. Суспензия в окружающей среде

Суспензионные частицы состоят из органических и неорганических частиц. Некоторые загрязняющие вещества разлагаются в результате химических и биологических процессов, происходящих в воде. Они называются разлагаемыми или биоразлагаемыми загрязнителями. Деградация относится к разложению на более простые вещества. Большинство органических загрязнителей разлагается. Однако некоторые органические вещества, такие как некоторые пестициды и моющие средства, не разлагаются или очень медленно разлагаются в воде. Эти типы суспензии называют жесткой или тугоплавкой органикой. К твердым пестицидам относятся хлорированные пестициды, такие как ДДТ, хлордан и эндрин. Классификация взвеси пыли по происхождению, размеру частиц и степени разложения представлена в таблице 3.20.

Таблица 3.20. Классификация взвеси на основе происхождения, размера частиц и степени разложения

На основе происхождения	
Неорганика	Органика
Масло, еда, химикаты	Листья деревьев, соломка, мелкий ил
На основе размера частиц	
Более 1000 мкм	Грубая суспензия
Менее 1 мкм:	Раствор
Менее 1×10^{-3} мкм	Коллоид
На основе степени разложения	
Разлагаемый материал	Листья, корни, пища и другие биологические вещества
Неразлагаемый материал	ДДТ, хлордан, эндрин и мелкий ил

Механизм взвеси взаимодействует с окружающей средой посредством реакции сорбции (раздел 6.4). Процесс сорбции охватывает как абсорбцию, так и адсорбцию. Абсорбция представляет собой механический процесс; адсорбция же представляет собой как физические, так и физико-химические процессы, но адсорбция является мостом, связывающим пыль и окружающую среду. Например, пылевая суспензия, связанная с радиоактивным и токсичным газом радона в воздухе и в воде, будет обсуждаться в разделе 10.5.

3.12. РЕЗЮМЕ

1. Определение естественной почвы присутствует в трех дисциплинах, такие как инженерия, геология и почвоведение.

2. Почва представляет собой полидисперсную систему, состоящую из твердой, жидкой и газообразной фаз. Характеристики каждого этапа были рассмотрены.

3. Механический состав основных классов почв, принятых Федеральным управлением автомобильных дорог и Геологической службой США, дан в таблице.

4. Обсуждаются текстура почвы, слои, горизонты и профили. Упрощенный PCA профиль почвы и системы горизонтов представлены на рисунке 3.3.

5. Система классификации почвы USDA обсуждается подробно, потому что эта система относительно тесно связана с экологической геотехнологией.

6. Химический состав природной почвы включает органическое вещество, песок, ил и глинистую фракцию; он обсуждается и обобщается.

7. Обсуждается соотношение кремнезема и полуторной окиси (SSR), что относится к естественным свойствам почвы; это соотношение представлено в соответствии со стандартными параметрами почвы, таким как индекс пластичности и активность.

8. Предложены процедуры визуальной идентификации загрязненных почв в инженерных целях. Процедуры включают в себя характеристики места (мест), воды и т. д. Эти характеристики включают почвенно-водную окраску, запах и трещины грунтовой почвы.

9. Предлагается простая система классификации загрязненной почвы на основе индекса чувствительности к загрязнению (PSI) и размеров частиц почвы. Эта система может использоваться для прогнозирования потенциального загрязнения почвы (почв) для предварительных исследований по проектированию, строительству и обслуживанию средств контроля за опасными и токсичными веществами или для других соответствующих применений.

ПРОБЛЕМАТИКА

3.1. Нужно четко различать системы идентификации почвы и системы классификации почвы. К какой из них относится Единая почвенная система и почему?

3.2 Без помощи лабораторного оборудования, как бы вы:

- определили органическую почву;
- определили неорганический ил;
- отличили илистую глину и высокопластичную глину;
- отличили очень мелкий песок и неорганический ил;
- определили, был ли влажный мелкий песок чистым или грязным.

3.3 Почва – это полидисперсная система, состоящая из твердой, жидкой и газообразной фаз. Обсудите кратко характеристики каждой фазы. Также кратко обсудите общие характеристики подзолистых почвенных профилей.

3.4 Было признано, что Карта обследования сельскохозяйственных почв – это не просто карта классификации продуктивности. Но на нее нельзя полагаться как на надежную карту состояния почвы. Пожалуйста, прокомментируйте это утверждение.

3.5 Профиль, исследуемый в центральной Пенсильвании, имеет следующие характеристики: очень мало органического мусора на поверхности, А-горизонт состоит из желтой глины, а В-горизонт слоя оксида железа подстилается бокситом. Профиль развился до глубины 15 футов.

- Является ли этот профиль в этом районе сугубо местным?
- К какому классу относится профиль? А к какому подклассу?

с. Насколько велика почвенная группа?

d. Какое объяснение вы можете дать для развития профиля в этой области?

3.6 Спецификации для наполнителя были установлены. По существу, спецификация материала состоит из требования к максимальному и минимальному размеру зерна и требования к индексу пластичности (PI). Вы бы порекомендовали спецификации материалов этого типа? Почему? Будьте максимально точны.

3.7. Определите соотношение кремнезема и полуторной окиси (SSR) и обсудить значение этого соотношения для идентификации глинистых минералов. Определить значения SSR для каолинитовых и иллитовых почв.

3.8 Почва имеет верхний предел пластичности (LL) 55 и предел пластичности (PL) 25. Содержание воды в почве, когда она выкапывается для использования в засыпке, составляет 30 %.

a. Является ли почва жесткой или мягкой при уплотнении при существующем содержании воды в засыпке?

b. Что легкий дождь сделал бы с консистенцией этой почвы?

3.9 Почему чувствительность к загрязнению глин связана с размерами частиц глины? Почему монтмориллонитовая глина более чувствительна к окружающей среде, чем иллитовая или каолинитовая?

3.10. Обсудите, какие типы параметров необходимы для характеристики загрязненной почвы и почему. Почему цвет и запах почвы и воды связаны с характеристиками загрязненной почвы?

4. Почвенная техника

4.1. Введение

Чтобы понять экологические аспекты почвенно-водных систем или взаимодействия в загрязненной почве и воде, необходимы знания технологии грунта, понятные геологам и педологам. Существует три основных системы частиц почвы, а именно: микропочвенная, макропочвенная и макро-микрокомпозитная системы частиц почвы, как обсуждалось в главе 3. Поскольку более мелкие частицы более чувствительны к окружающей среде, в этой главе особое внимание уделяется системе микропочвенных частиц, которая включает минералогию глины, структурные единицы почв и их взаимодействие, коллоидное состояние, систему глина–вода–электролит, гидрофобные и гидрофильные почвы, а также гомойные и искусственные почвы.

Кроме того, чтобы понять взаимосвязь между результатами испытаний и основным поведением глины в микроскопическом масштабе, необходимы знания химии, физикохимии и биологии. Эти практические знания по химии важны для фактического понимания конкретного результата теста, который количественно измеряет влияние конкретной поровой жидкости на определенную глину или свойства глины. Понимание этого процесса имеет важное значение для инженерного использования природных материалов для локализации опасных и токсичных отходов. Без этих знаний о поведении глины в ответ на опасные отходы любой проект инженерных систем (например, программы корректирующих действий) не может иметь надежной основы для прогнозирования долгосрочного поведения этой системы.

4.2. МИНЕРАЛОГИЯ ГЛИНЫ

4.2.1. Общее обсуждение

Понятия глинистой минералогии необходимы для изучения поведения почвы и почвенно-водной системы; работы в этой области начались в 1887 году Ле Шателье и продолжены Ловенштейном в 1909 году. Эти концепции были хорошо установлены Хаддинггом из Швеции в 1923 году и Ринном из Германии в 1924 году. Геологическая служба США начала исследование в 1924 году в лице Росса и Шеннона. Инженерные применения концепций глинистой минералогии, относящейся к фундаментостроению, были даны Casagrande (1932), а материалы для стабилизации грунта и строительства дорог – Winterkorn и Baver (1934) и Winterkorn (1937). Дальнейшие применения в различных геотехнических задачах представили Grim (1953) и Lambe (1953). Последние разработки в области физико-химических свойств минералов почвы даны Yong и Warkentin (1966), Ingles (1968), Winterkorn и Fang (1975, 1991), Mitchell (1976, 1993), Bennett и соавторами (1991) и Velde (1992).

4.2.2. Требования к минералогическим данным

Почва содержит различные природные минералы. Минералогический состав глинистых систем определяет гранулометрический состав и многие физико-химические свойства. Следующие основные факторы необходимы для инженерных изысканий:

- структуры слоистых силикатов;
- распределение частиц по размерам;
- межчастичные силы:
 - силы притяжения;
 - отталкивающие силы;
 - энергия взаимодействия;
- удержание воды и гидравлическая проводимость (глава 7);
- теплоемкость и теплопроводность (глава 8).

4.3. СТРУКТУРНЫЕ ЕДИНИЦЫ ПОЧВ

4.3.1. Общее обсуждение

Структурные единицы почв состоят в основном из оксида кремния (SiO_2), оксида алюминия (Al_2O_3) или оксида железа (Fe_2O_3) с различными количествами других элементов. Минералы силикатного слоя состоят из двух основных структурных единиц: листов кремнезема и листов брусита (B) или гиббсита (G), как показано на рисунке 4.1. По сути, они представляют собой кислородные структуры, которые склеены Si, Al, Mg, а также другими катионами. При рассмотрении рисунка 4.1 можно увидеть три типа символов, представляющих листы кремнезема, брусита и гиббсита. Эти символы часто появляются в литературе. В общем, тип 1 обычно используется в геотехнической инженерии; типы 2 и 3 используются в геологических и сельскохозяйственных науках.

4.3.2. Глинистые минеральные структуры

Глинистые минералы образованы различными комбинациями тетраэдрических и октаэдрических листов, как показано на рисунке 4.1. Если минерал состоит из одного октаэдрического листа и одного тетраэдрического листа, его называют минералом один к одному (1:1). Аналогичным образом, глинистые минералы, которые состоят из комбинации двух тетраэдрических листов и одного октаэдрического листа для образования одного слоя, известны как минералы два к одному (2:1). Третий основной тип минерала известен как минерал два к одному к одному (2:1:1) и состоит из попеременно тетраэдрического листа и октаэдрического листа, тетраэдрического листа и октаэдрического листа. Затем три основных типа минералов 1:1, 2:1 и 2:1:1 подразделяются на группы или подгруппы в зависимости от конфигурации октаэдрического листа. Структурная классификация слоистых силикатов, предложенная Warsaw (1962), представлена в таблице 4.1.

Структурное расположение ионов кислорода (O^{2-}) является преобладающей особенностью, к которой электрическая нейтрализация должна подходить как можно лучше. Если катионный клей не обеспечивает достаточно положительных зарядов в минеральной структуре, то избыточные отрицательные заряды кислородных структур должны быть удовлетворены на минеральных поверхностях путем адсорбции положительных ионов, включая H^+ , из окружающей среды. Эти ионы можно обменять на других. Это свойство называется базовой обменной емкостью или ионообменной емкостью (ИЕС) глинистого минерала.

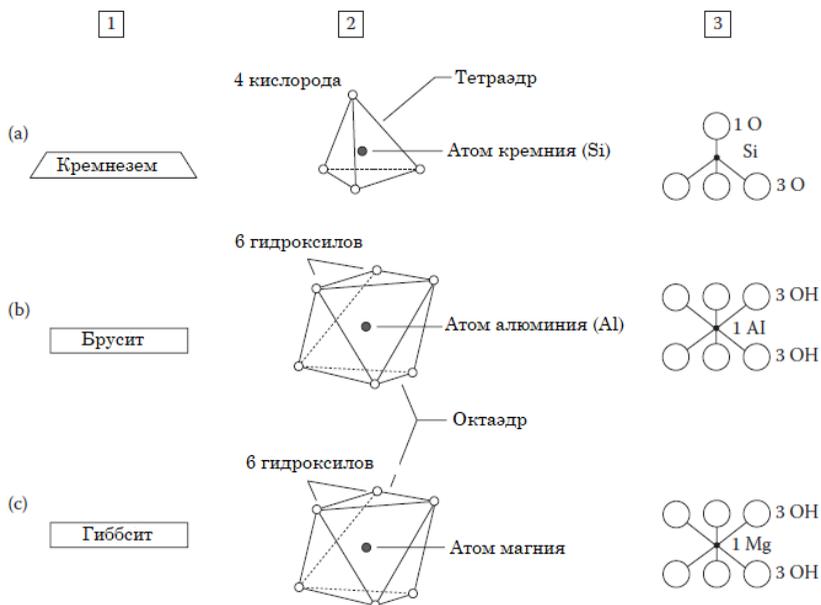


Рисунок 4.1. Структурные единицы глинистых минералов: (a) лист кремнезема, (b) лист брусита и (c) лист гиббсита.

Таблица 4.1. Структурная классификация слоя силиката

Группа	Промежуточные составляющие	Минералы	
		Диоктаэдрический	Триоктаэдрический
Трехслойные 1:1 7 Å	Нет	Каолининовая группа: каолинит дикит накрит	Змеиная группа: хризотил лизардит антигорита шамозит и др.
Трехслойные 2:1 10 Å	Переменная H ₂ O Нет Na, Ca, Mg, H ₂ O (Расширенные минералы 2:1) Катионы + H ₂ O	Галлуазит Пирофиллит Монтмориллонитовая гр.	Тальк Монтмориллонитовая гр. Вермикулит
	Смеси: слюда + расширенные K, Na, Ca (слюды)	Смешаннослойные минералы Мусковит Иллит Глауконит Маргарит	Лепидолит Флогопит Биотит
Четырехслойные 14 Å	Нет		Хлориты
Трехслойные плюс четырехслойные	Mg + H ₂ O		Корренсит «Набухший хлорит»

4.3.3. Идентификация и определение глинистых минералов

Основные строительные блоки, тетраэдрический лист из диоксида кремния и октаэдрический лист из глинистых минералов можно схематически представить, как показано на рисунках 4.1 и 4.14. Различные схематические диаграммы, часто встречающиеся в литературе, представляющие тетраэдрические и октаэдрические единицы, также представлены для сравнения. Символически, используя символы для основных строительных блоков, можно сделать обзор структуры первичных минеральных групп. Для идентификации типов минералов могут быть использованы различные лабораторные методы, такие как ультрапакетные, сканирующие электронные и другие. Кроме того, интерпретация физических свойств и микроструктуры глинистых частиц может быть выполнена методами микроанализа. Краткое описание каждого обычно используемого метода представлено далее. Существует множество методов определения состава глинистых минералов, включая рентгеноструктурный анализ, дифференциальный термический анализ, оптическую микроскопию и электронную микроскопию. Среди этих четырех методов рентгеноструктурный анализ и дифференциальный термический анализ являются наиболее распространенными методами, используемыми в геотехнологии.

4.3.3.1. Рентгеноструктурный анализ (XRD)

Рентгеноструктурный анализ используется для изучения формы и структуры кристаллических агрегатов. Среднее межплоскостное расстояние и средний состав атомных плоскостей могут быть получены из XRD-анализа. Набор типичного рентгенофазового анализа четырех распространенных глинистых минералов – хлорита, иллит, каолинита и монтмориллонита – показан на рисунке 4.2.

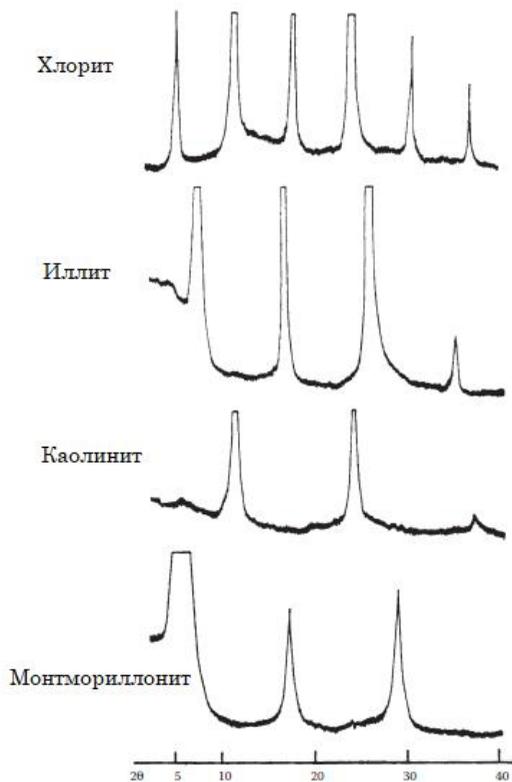


Рисунок 4.2. Типичный рентгеноструктурный анализ некоторых глинистых минералов (по Shibuya, T. [1973], Geological Study of Landslide Clay, KICT Report № 10, Kajima Institute of Construction Technology, Tokyo, 37 p.).

4.3.3.2. Дифференциальный термический анализ (DTA)

Исследование DTA связано с молекулами воды в глине. Оно состоит из одновременного нагрева испытуемого образца и термически инертного вещества с постоянной скоростью от 10°C в минуту до более 1000°C и непрерывного измерения разницы в температуре между образцом и инертным материалом. Различия в температуре между образцом и инертным веществом отражают реакции в образце, вызванные нагревом. Типичные результаты испытаний DTA

представлены как разница в температуре между образцом и инертным веществом в зависимости от температуры. Анализ результатов испытаний состоит в сравнении известных материалов. Подробные обсуждения предоставили Тап и соавторы (1986).

4.3.3.3. Сканирующий электронный микроскоп (SEM)

SEM имеет диапазон увеличения от 20 до 150 000 и глубину резкости примерно в 3000 раз больше, чем у светового микроскопа. Сами частицы глины и поверхности растрескивания через массы грунта можно наблюдать непосредственно, и это эффективный метод измерения частиц размера глины. Морфология агрегатов также может быть определена с помощью SEM. Принципы, методы измерения и типичные примеры SEM приведены в работе Sudo и соавторов (1981). Существует множество коммерческих методов, которые включают термогравиметрический анализ (TGA) и просвечивающую электронную микроскопию (TEM). Исследование TGA также касается молекул воды в глинах. TEM исследует формы отдельных кристаллов и состав этих отдельных кристаллов.

4.4. РАЗМЕР И ФОРМА ИЗМЕРЕНИЯ ПОЧВЫ

4.4.1. Эффективный размер и коэффициент однородности

В разделе 2.5 обсуждались основные характеристики гранулированных частиц и их измерение. Различия между валуном, булыжником, гравием и песком также обсуждались и классифицировались в разделе 3.4. Будет представлено дальнейшее обсуждение по определению размера и формы по эффективному размеру (D_{10}), коэффициенту однородности (C_u) и площади поверхности частиц как макро-, так и микропочвы на единицу.

Термины «эффективный размер» и «коэффициент однородности», обычно используемые в геотехнологии, полезны для оценки размера и формы частиц почвы, относящихся к окружающей среде, как для макро-, так и для микропочвенных частиц. Термин эффективного размера, D_{10} , как определено из анализа сита, представляет собой размер отверстия сита, который позволяет 10 процентам гранулированного материала проходить и сохраняет 90 %, как показано на рисунке 4.3.

Коэффициент однородности (C_u) представляет собой отношение размера проходных отверстий экрана 60 % к проходному 10 %, как показано на рисунке 4.3; $C_u = D_{60}/D_{10}$.

Пример 4.1

Определите эффективный размер D_{10} и коэффициент однородности C_u для равномерно сортированного грунта (кривая **a**) и хорошо классифицированного грунта (кривая **b**), как показано на рисунке 4.3.

Решение

Из однородного грунта кривой **a** на рисунке 4.3 $D_{10} = 0,8$ мм и $D_{60} = 1,5$ мм, таким образом:

$$C_u = 1,5 / 0,8 = 1,875$$

Из хорошо классифицированного грунта кривой **b** на рисунке 4.3 $D_{10} = 0,025$ мм и $D_{60} = 1,0$ мм, таким образом:

$$C_u = 1,0 / 0,025 = 40,0$$

На основании приведенных выше данных в примере 4.1 показано, что для однородной почвы коэффициент однородности составляет 1,875, а для хорошо отсортированной почвы – 40,0. Следовательно, чем меньше соотношение, тем более однороден материал. Наименьшее теоретическое значение для этого отношения составляет 1,0. Для песчаного пляжа сообщаются значения C_u в диапазоне от 1,2 до 3,4 и значения D_{10} в диапазоне от 0,15 до 1,43 мм (раздел 14.4). Значения C_u для почв с разрывами или признаками выветривания могут достигать 400.

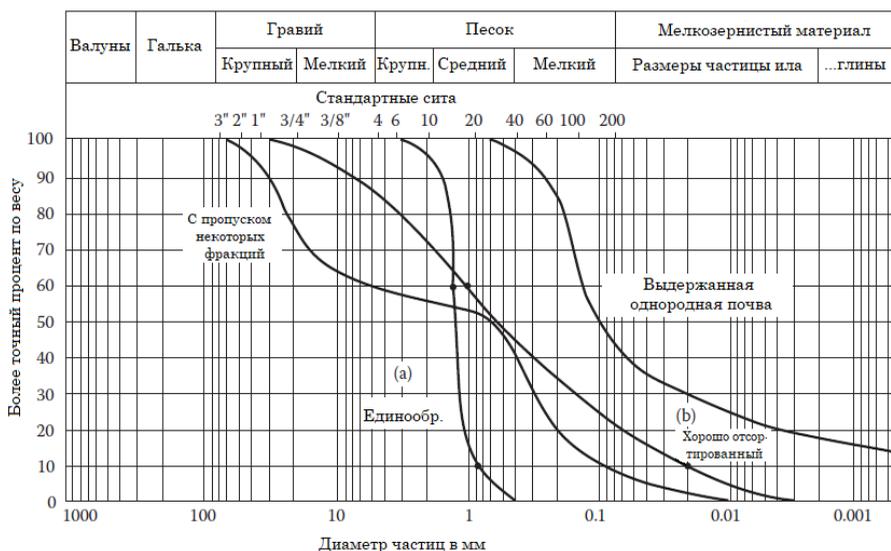


Рисунок 4.3. Типичная диаграмма распределения размеров зерна ASTM – ASCE.

4.4.2. Измерение размера и формы гранулированных почв

Площадь поверхности частиц является важным параметром, касающимся влияния электрических зарядов на характеристики частиц. Для зернистой почвы площадь поверхности на единицу объема (то есть удельная площадь поверхности) мала по сравнению с мелкозернистой почвой. Размер гранулированных

материалов может быть определен их объемными отношениями или прямым измерением. Объемные отношения в гранулированных системах могут быть выражены фазовыми объемами, абсолютными объемами, соотношением пустот или пористостью. Объем фазы – это часть общего объема, вносимого различными твердыми, жидкими и газообразными компонентами системы, выраженная в виде доли или процента от общего объема.

Абсолютный объем – это фактический объем, занимаемый различными фазами, обычно выражаемый в объемных единицах, используемых в технике, таких как кубический фут, кубический ярд или кубический метр. Сумма абсолютных объемов фазы должна давать общий или составной объем. Методы измерения размера и формы макрочастиц и микропочвенных частиц приведены в таблице 4.2.

4.4.3. Площадь поверхности для мелкозернистой почвы

Удельная площадь поверхности для мелкозернистой почвы гораздо важнее, чем для зернистой почвы, – для изучения взаимодействия почвы и воды в окружающей среде (таблица 4.2). Поскольку отношение площади поверхности к массе большинства частиц глины является высоким для электрических сил на поверхностях частиц и влияет на Техническое поведение этих частиц и их агрегаций, было предложено множество методов для определения площади поверхности для мелкозернистых почв. Большинство методов требуют сложного и деликатного оборудования и сложных методов для измерения площади поверхности. Sridharan и Rao (1972) предлагают простую процедуру с разумной точностью, которая называется методом эксикатора.

Таблица 4.2. Краткое описание методов измерения размера и формы

Прямые методы
Штангенциркуль (большие элементы)
Оптический микроскоп
Сканирующий электронный микроскоп
Дифракция рентгеновских лучей (рисунок 4.2)
Просеивание и скрининг
Размер частиц от 10 до 4×10^{-3} см.
Фильтрация (как форма просеивания)
Фильтровальная бумага, нитроцеллюлозные пленки, молекулярные фильтры
Методы седиментации и воздушной сортировки
Стандартизированные методы седиментации и методы воздушной сортировки
Вычисления с поверхности (косвенные методы)

$$S = \frac{\omega}{M} \frac{N}{10^4} A \times 10^{-16} \quad (4.1)$$

где

S = удельная поверхность, м²/г;

ω = равновесное содержание влаги в грамме воды, адсорбированной на грамм почвы;

N = число Авогадро ($6,02 \times 10^{23}$);

M = молекулярный вес воды (18,016 г);

A = площадь в см^2 Ангстрем на молекулу воды (10,8 Å).

Следовательно,

$$S = 3612 \omega \text{ (m}^2\text{/g)} \quad (4.2)$$

4.5. СВЯЗИ ЧАСТИЦ, ЭНЕРГИИ СВЯЗИ И СОЕДИНЕНИЯ

4.5.1. Соединение частиц

В атомах и молекулах, содержащих частицы глины, существуют две основные связи: первичная связь и вторичная связь. Первичная связь, также называемая межатомной связью, представляет собой связь между атомами, образующими молекулы. Эти связи прочны и не так легко ломаются во время обычных инженерных работ. Вторичная связь – это те атомы в одной молекуле, которые связаны с атомами в другой молекуле. Существует два типа вторичных связей: силы Ван-дер-Ваальса и водородные связи.

1. Силы Ван-дер-Ваальса слабее водородных связей. Эти силы обычно объясняются электрическим или электромагнитным притяжением между системами молекул.

2. Водородные связи представляют собой особый тип дипольной силы. Если водород является положительным концом постоянного диполя, то результирующее притяжение отрицательно заряженного диполя называется водородной связью. Водородные связи сильнее, чем обычные дипольные силы, так как они образуются с атомами, которые сильно электромагнитны, чтобы приблизиться к атому водорода более близко. Водородные связи существенно влияют на физико-химические свойства глинистых минералов, что будет обсуждаться позже.

Если частицы, составляющие систему, подпадают под один и тот же размер или массу, прочность связи будет в первую очередь определять твердый или жидкий характер системы, как говорилось в разделе 2.4. Энергетические диапазоны для различных типов связей показаны в таблицах 2.3 и 2.4. Для большинства неорганических соединений значения прочности связи, которые являются достаточно точными для инженерных целей, могут быть рассчитаны в предположении простого ионного или дипольного притяжения, и в большинстве минералов почвы, а также в воде основному количеству твердого атомного объема способствуют ионы кислорода.

4.5.2. Энергии связей

Для удобства энергии связей обычно выражаются в килокалориях на моль. Разделив число Авогадро ($6,02 \times 10^{23}$), можно получить энергию на одну связь, которую можно преобразовать в *эрги* или другие подходящие единицы энергии. Наконец, путем деления на длину связи или соответствующую ее кратность можно получить силу связи, которая делится на соответствующее молекулярное или ионное поперечное сечение, которое дает силу связи в силе на единицу поперечного сечения. Тип притяжения, связанный с энергией взаимодействия, обсуждался в разделе 2.3, а условия устойчивости для различных взаимодействующих пар, представляющих интерес для нашей темы, обобщены в таблице 2.3. Диапазоны энергий связи также приведены в таблице 2.4.

Чтобы проиллюстрировать процедуру расчета, используется прочность связи воды, отраженная пределом прочности на разрыв, как показано в примере 4.2. На рисунке 4.4 представлена взаимосвязь между энергией связи и степенью загрязнения. Степень загрязнения почв увеличивается с уменьшением энергии связи между частицами. Данные об энергии связи, использованные на рисунке 4.4, получены из работы Pauling (1960) и таблицы 2.4.

Пример 4.2. Расчет прочности на растяжение воды.

Решение (по Winterkorn, 1974)

Метод [A]: расчет прочности на растяжение воды – грубое приближение.

[1] Определение размера молекулы воды.

Предположим: 1 моль H_2O (18 см^3) подразделяется на $6,02 \times 10^{23}$ кубика одинакового размера, каждый содержит одну молекулу H_2O .

Объем каждого куба = $18 / 6,02 \times 10^{23} = 29,9 \times 10^{-24} \text{ см}^3$

Длина стороны куба = $\sqrt[3]{29,9 \times 10^{-24}} = 3,1 \times 10^{-8}$

Площадь кубической стороны = $9,6 \times 10^{-6} \text{ см}^2$

[2] Определение энергии связи.

Предположим: общая энергия связи = теплота испарения (H_v). H_v при нормальной температуре кипения (100°C)

= $539 \text{ кал / г} = 9,7 \text{ ккал / моль}$

Нагревание требуется для доведения 18 г воды от 20 до 100°C

= $80 \times 18 = 1440 \text{ кал}$

= $1,44 \text{ ккал}$

Требуемое общее количество тепла = $9,7 + 1,44 = 11,14 \text{ ккал}$

Работа против атмосферы для 1 моль газа H_2O :

$W = PV + RT$, где R = газовая постоянная

= $1,9 \text{ кал}$ ($T = 373 \text{ K}$)

$W = 710 \text{ кал} = 0,71 \text{ ккал}$

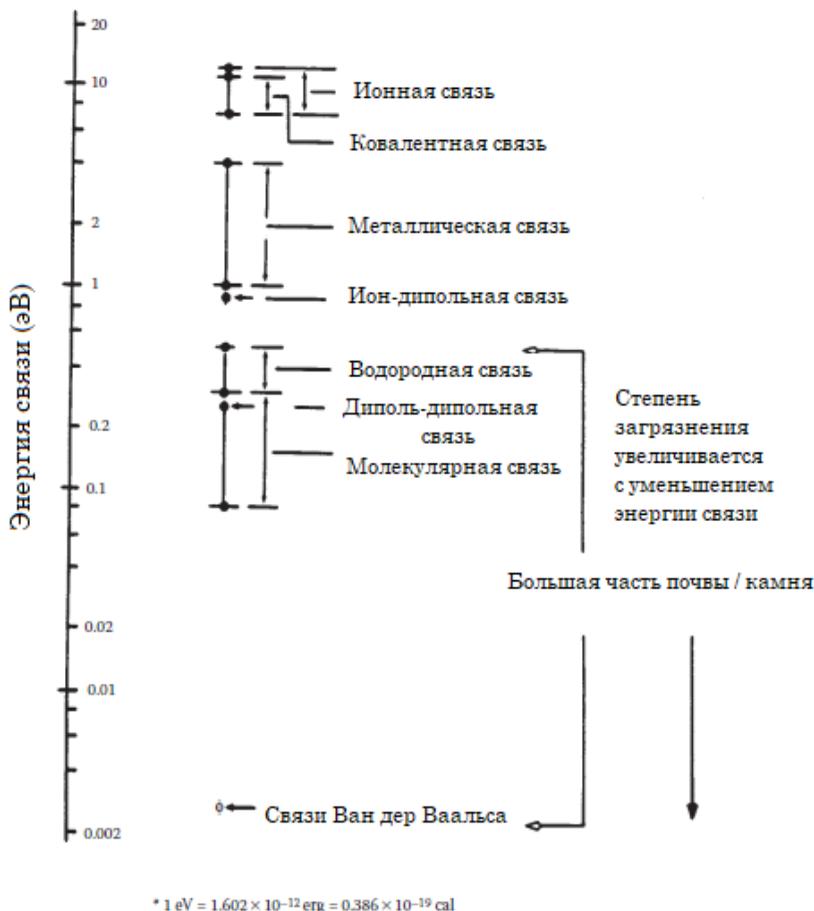


Рисунок 4.4. Энергетические диапазоны для различных типов связей, связанных со степенью загрязнения почвы (Н. У. [1997], Introduction to Environmental Geotechnology, CRC Press, Boca Raton, FL, 652 p.).

[3] Фактическая энергия молекулярного разделения.

$$\begin{aligned}
 E &= 11,14 - 0,71 = 10,43 \text{ ккал/моль} \\
 &= 10,43 \times 4,185 \times 10^{10} = 44,8 \times 10^{10} \text{ erg/моль} \\
 &= 44,8 \times 10^{10} / 6,02 \times 10^{23} = 7,44 \times 10^{-3} \text{ erg/куб}
 \end{aligned}$$

[4] Распределение энергии склеивания.

Предположим: энергия связи равномерно распределена по шести сторонам куба:

$$7,44 / 6 = 1,24 \times 10^{-13} \text{ erg / грань куба}$$

$$\text{Грань куба} = 9,6 \times 10^{-6} \text{ см}^2$$

$$\text{Следовательно: } 1,24 \times 10^{-13} : 9,6 \times 10^{-6} = 1,3 \times 10^2 \text{ erg/см}^2$$

[5] Прочность при растяжение воды.

Для полного разделения кубики должны быть перемещены на одну сторону, то есть $3,1 \times 10^{-8}$ см,

затем $1,3 \times 10^2$: $3,1 \times 10^{-8}$

$= 42 \times 10^8$ дин/см²,

C 981 дин = 1 г силы

$9,81 \times 10^5 = 1$ кг

42×10^8 : $9,81 \times 10^5 = 4270$ кг/см²

= 60 600 фунтов на квадратный дюйм

Метод [B]: расчет по поверхностному натяжению.

[1] Подход

Предположим: мы создаем две поверхности размером 1 см², раздвигая столб воды с поперечным сечением 1 см².

Поверхности представляют энергию $2 \times 72,8 = 145,6$ erg

[2] Прочность на растяжение воды

Предположим: далее нам пришлось разделить новые поверхности на две длины связи, в это время растягивающее напряжение (TS) равномерно уменьшалось с TS до 0 со средним значением TS / 2.

Далее:

$145,6 \text{ erg} = (TS / 2) (2 \times 3,2 \times 10^{-8} \text{ см})$

$TS = 145,6 / 3,1 \times 10^{-8}$ дин/см²

$= 47 \times 10^9$ дин/см²

$= 4,78 \times 10^3$ кг/см²

В дополнение к примеру 4.2 существуют другие различные подходы для расчета предела прочности на растяжение воды. Такие подходы включают в себя метод модуля объемной эластичности, и предлагается центрифужный подход.

4.5.3. Связь между частицами

Связи между частицами в основном представляют собой адсорбированную воду, вода–диполь или диполь–катион–диполь, как показано на рисунке 2.5. Эти связи намного слабее, чем сильные связи, как обсуждалось в предыдущем разделе. К таким типам сцепления относятся многие природные проблемные месторождения почвы, такие как остаточные почвы, глинистые сланцы, дисперсионные глины, сминающиеся илы и растворимые карбонатные породы. Кроме того, к этим типам сцепления относятся также искусственные композитные материалы, такие как гравийно-известковая и стабилизированная зольная почва.

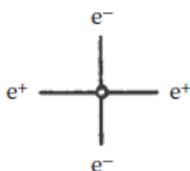
4.6. МЕЖЧАСТИЧНЫЕ ЭНЕРГИИ ИЛИ СИЛЫ

4.6.1. Дипольный момент и эффект ориентации

Все микрочастицы почв несут электрический заряд. Когда две частицы находятся близко друг к другу в расположении лицом к лицу, между заряженными поверхностями и промежуточными обменными катионами

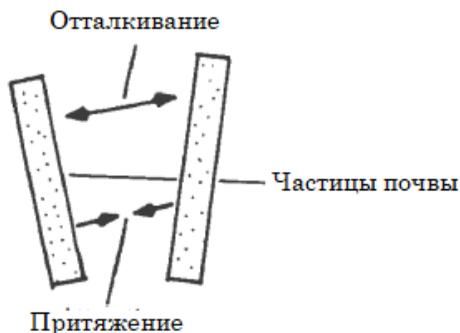
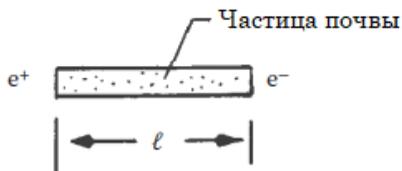
существует сила притяжения. Если атомы на смежной поверхности приближаются друг к другу так близко, что их внешние электронные оболочки перекрываются, то получается чистая сила отталкивания. Когда различные энергии притяжения и отталкивания суммируются алгебраически, получается чистая энергия взаимодействия. Некоторые основные характеристики межчастичных структур почвы показаны на рисунке 4.5.

Неполярная система



(a)

Диполь



(b)

Рисунок 4.5. Основные характеристики межчастичных структур: (a) неполярная система и движение диполя; (b) силы отталкивания и притяжения между частицами (Fang, H. Y. [1997], Introduction to Environmental Geotechnology, CRC Press, Boca Raton, FL, 652 p.).

Если центр действия положительных зарядов совпадает с центром действия отрицательных зарядов, система не имеет дипольного момента и называется неполярной системой; в противном случае она называется полярной (рис. 4.5a). Эффект, состоящий из притяжения между противоположно заряженными концами постоянных диполей с расстоянием (l), называется эффектом ориентации. Этот эффект сильно зависит от температуры. Единицей дипольного момента является *дебай*. Дебай определяется как молекула в единице, которая разделяет электрические заряды на $0,21 \text{ \AA}$ и имеет дипольный момент 1 дебайную единицу. Типичные данные для различных материалов перечислены как:

Вещество	Дипольный момент (Дебай)
Вода	1,89
Уксусная кислота	1,74
Ацетон	2,90
Анилин	1,55
Бензол	0
Четыреххлористый углерод	0

4.6.2. Энергия или сила притяжения

Когда две частицы находятся близко друг к другу в расположении лицом к лицу, существует сила притяжения между отрицательно заряженными поверхностями и промежуточными обменными катионами. На рисунке 4.5 (b) показаны силы притяжения и отталкивания между двумя частицами глины. Несколько формул, предложенных для оценки этих сил, представлено ниже.

4.6.2.1. Уравнение Норриша (1954)

Согласно Норришу (1954), если отношение катиона к поверхности сходно с отношением точечного заряда к толстому плоскому проводнику, энергия притяжения, E_A , определяется как

$$E_A = \sigma v e / 2 d \epsilon \quad (4.3)$$

где

E_A = энергия притяжения, erg/cm^2 ;

σ = плотность поверхностного заряда;

v = ионная валентность;

e = электронный заряд;

d = расстояние между ионами и поверхностью;

ϵ = диэлектрическая проницаемость.

Если межчастичные катионы и заряженная поверхность рассматриваются как пластины конденсатора с параллельными пластинами, E_A становится

$$E_A = 2 \pi \sigma^2 d / \epsilon \quad (4.4)$$

Когда катионы находятся далеко друг от друга, применяется уравнение 4.3; когда они находятся близко друг к другу, применяется уравнение 4.4. На самом деле энергия притяжения, вероятно, будет между уравнениями 4.3 и 4.4.

4.6.2.2. Уравнение Макьюэна (1954)

Макьюэн постулировал, что при разное поверхности менее, чем на 10 \AA , промежуточные катионы расположены в одном слое, который электрически притягивает противоположные поверхности, как указано выше. Однако на больших расстояниях, когда доступно больше места, происходит сегрегация. В результате образуются два слоя катионов, один из которых прикрепляется к каждой минеральной поверхности

$$E_A = \frac{2\sqrt{\sigma^2 e v}}{\epsilon} \exp \left[-2\pi r \frac{\sqrt{\sigma}}{e v} \right] \quad (4.5)$$

где r – расстояние между катионными слоями. Другие символы такие же, как в уравнении 4.3.

4.6.2.3. Джордин и соавторы (1962) и уравнение Джордина (1963)

В работе Джордина и соавторов 1962 года и работе Джордина 1963 года говорится, что энергия притяжения, возникающая в результате взаимодействия между заряженными поверхностями и промежуточными катионами, описывается так:

$$E_A = \frac{(\epsilon_{\omega} - \epsilon_m) \sigma v e}{\epsilon_{\omega} (\epsilon_{\omega} + \epsilon_m) 4 d} - \frac{z \pi \sigma^2 d}{(\epsilon_{\omega} + \epsilon_m)} \quad (4.6)$$

где ϵ_{ω} – диэлектрическая проницаемость для – воды, а ϵ_m – диэлектрическая проницаемость для монтмориллонита. Уравнение 4.6 справедливо только в том случае, если d меньше толщины слоя глины; первый член представляет энергию взаимодействия между промежуточными катионами и их индуцированными электрическими изображениями в глине; второй член представляет энергию взаимодействия между этими катионами и постоянными зарядами на глине.

4.6.3. Энергия или сила отталкивания

Если атомы на соседних поверхностях приближаются друг к другу так близко, что их внешние электронные оболочки перекрываются, происходит отталкивание. Такое отталкивание – это так называемое отталкивание Борна. Далее предлагаются несколько уравнений.

4.6.3.1. Уравнение Полинга (1945, 1960)

$$E_R = \frac{B e^2}{R^n} \quad (4.7)$$

где

E_R = энергия отталкивания;

B = постоянная;

e = электронный заряд;

R = расстояние между атомами в соседних поверхностях;

$n = 9$ (но зависит от вида участвующих атомов).

Уравнение 4.7 указывает, что силы отталкивания вызваны тем, что их внешние электронные оболочки перекрываются в так называемом отталкивании Борна. Второй тип отталкивания, который предложил Van Olphen (1954), связан с диполь-дипольным взаимодействием. Как определяется энергия отталкивания, будет рассказано далее.

4.6.3.2. Уравнение Ван Олфена (1954)

$$E_R = \frac{8\mu^2}{\epsilon} [h(s, l)] \quad (4.8)$$

где

μ = дипольный момент на единицу площади;

s = длина диполя (рисунок 4.5а);

l = ближайшее расстояние между плоскостями одинаковых полюсов;

ϵ = диэлектрическая проницаемость.

l – самое близкое расстояние между плоскостями одинаковых полюсов, а $h(s, l)$ – сложная функция от s и l , которая для простоты здесь не приводится. Поскольку μ и s зависят от числа и расположения узлов заряда в кристаллической решетке, минералогический состав определяет величину соответствующей энергии отталкивания.

4.7. РАСПОЛОЖЕНИЕ ЧАСТИЦ И ГЛИНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

4.7.1. Расположение частиц и структуры

Часто используются два основных типа расположения частиц: ориентация с флокуляцией, которая представляет собой расположение от края к лицу, и дисперсионная ориентация, которая является расположением лицом к лицу (рис. 4.6). К основным факторам, вызывающим склонность почвы к флокуляции, относятся увеличение концентрации электролита, валентности иона и температуры или уменьшение диэлектрической проницаемости поровой жидкости, размера гидратированного иона, значения pH и адсорбции анионов, как показано в таблица 4.3. Таблица 4.3 основана на теории двойного электрического слоя Гуи–Чепмена, пояснения будут представлены в разделе 9.8.

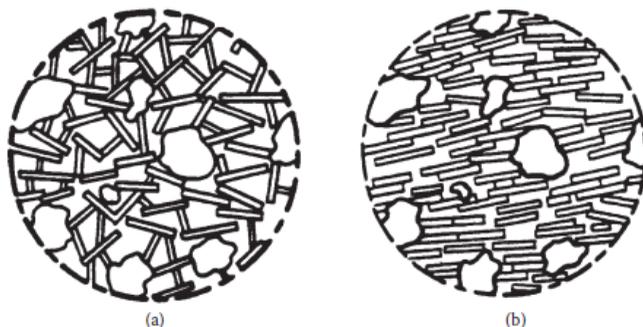


Рисунок 4.6. Флокулированные и дисперсные структуры: (а) флокулированная структура и (b) дисперсная структура.

Для идеализированных структур глины различные исследователи предложили несколько структурных систем. Barden и Sides (1971) предположили, что глиняные сооружения включают карточный домик, книжный домик, медовые соты, рассеянную субстанцию, турбостратную субстанцию и штабель. Yong и Sheegan (1973), Collins и McGown (1974) и другие предложили системы микротканей и макротканей для идеализированных глиняных структур, включая морские глины. Кроме того, Bennett и соавторы (1991) представляют микроструктуру мелкозернистого осадка, который покрывает от грязи до сланца.

Таблица 4.3. Факторы окружающей среды как отражение физико-химических параметров структуры и поведения почвы

Параметр	Двухслойная толщина		Структура почвы	
	Увеличение	Уменьшение	Дефлокулированная	Флокулированная
Концентрация электролита	Уменьшение	Увеличение	Уменьшение	Увеличение
Ионная валентность	Уменьшение	Увеличение	Уменьшение	Увеличение
Диэлектрическая проницаемость	Увеличение	Уменьшить	Увеличение	Уменьшение
Температура	Высокая	Низкая	Увеличение	Уменьшение
Размер гидратированного иона	Большой	Небольшой	Увеличение	Уменьшение
Значение pH	Высокое	Низкое	Увеличение	Уменьшение
Анионная адсорбция	Увеличение	Увеличение	Увеличение	Увеличение

Источник: основано на: J. C. et al. (1983), Proc. 5th Mid-Atlantic Industrial Waste Conf., pp. 557–568; Evans, J. C. (1991), Foundation Engineering Handbook, 2nd ed., Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 750–777.

Таблица 4.4. Типичные значения изоморфного замещения

Типы минералов	Изоморфное замещение (свойства и количество)
Хлорит	Al на Si, Fe; Al на Mg
Галлуазит (2H ₂ O)	Al на Si (1 на 100)
Галлуазит (4H ₂ O)	Al на Si (1 на 100)
Иллит	Al на Si (1 в 7); Mg, Fe на Al; Fe, Al на Mg
Каолинит	Al на Si (1 на 400)
Монтмориллонит	Ng на Al (1 в 6)
Московит	Al на Si (1 в 4)
Тальк	Нет
Вермикулит	Al, Fe на Mg; Al на Si

Источник: Данные из: Grim, R. E. (1968), Clay Mineralogy, 2nd ed. (1st ed. 1953), McGraw-Hill, New York; Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1979), Soil Mechanics, SI Version, John Wiley & Sons, New York.

4.7.2. Изоморфное замещение

Изоморфное замещение часто используется при характеристике строения глинистого минерала. Это просто замена катионов в структуре. Изоморфная замена одного катиона другим часто приводит к дефициту заряда. То есть, например, один катион с зарядом +3 замещен катионом с зарядом +2, дефицит заряда +1 существует в области этого замещения. Емкость катионного обмена (СЕК) глинистого минерала является количественной мерой способности этого глинистого минерала к замещению катиона. Некоторые типичные значения представлены в таблице 4.4.

Глина адсорбирует катионы с фиксированным суммарным зарядом при заданных условиях. Эти катионы могут быть заменены группой различных ионов, имеющих одинаковый полный заряд, посредством изоморфного замещения, разорванных связей, как обсуждалось Kelley (1948) и Grim (1968). Эти замены зависят от валентности, типов ионов, размера ионов и т. д. Типичный ряд замещаемости выглядит следующим образом:



В некоторых случаях приведенное выше утверждение может быть неверным при изменении местных условий окружающей среды. Дальнейшее обсуждение, относящееся к экологической геотехнологии, при случае будет встречаться в каждой главе.

4.8. ИОНООБМЕННАЯ РЕАКЦИЯ И ИОНООБМЕННАЯ ЕМКОСТЬ

4.8.1. Общее обсуждение

Важность феномена ИЕС была признана в таких областях, как почвоведение, биохимия, микробиология, пищевые технологии и медицина; однако, очень мало внимания уделялось инженерно-геологическому строительству. Согласно обзорам Kelley (1948), Grim (1968), Koryta (1991) и Wachinski и Etzel (1996), феномен ионного обмена был обнаружен Томпсоном в 1850 году и Way в 1850–1852 годах. Они проиллюстрировали, что глинистые минералы обладают свойством поглощать определенные катионы и анионы и удерживать эти ионы в обменном состоянии. В количественных исследованиях, проведенных Гедройзом между 1912 и 1913 годами и Хиссинком между 1922 и 1932 годами, этот феномен обмена назван основным обменом или ионным обменом. Впервые применение ионообменной техники в строительстве дорог, стабилизации почвы и разработке грунтов было сделано профессором Х. Ф. Винтеркорном в начале 1930-х годов (Winterkorn, 1937).

Существует два типа ионообменных механизмов: катионный обмен и анионный обмен. Имеется много информации о катионном обмене; однако очень мало данных найдено об анионном обмене из-за сложной реакции во время процесса обмена, потому что трудно выделить эти реакции для измерения. С

инженерно-геологической точки зрения, ионообменная реакция вызывает два важных явления.

1. Эта реакция может вызвать изменения в структуре почва–вода от дисперсных к флокулятивным структурам или наоборот (рисунок 4.6).

2. Это может изменить поведение воды, например превратить жесткую воду в мягкую воду путем удаления ионов кальция (Ca^{2+}) и магния (Mg^{2+}).

4.8.2. Характеристики и механизмы ионообменной реакции

4.8.2.1. Общее обсуждение

Как говорилось в разделе 2.2 и приводилось в таблице 2.1, обычные атомы являются нейтральными; однако при определенных обстоятельствах атомы могут стать электрически заряженными. Такие заряженные атомы называются ионами. Некоторые атомы образуют положительные (+) ионы, называемые катионами, а некоторые образуют отрицательные (–) ионы, называемые анионами. Заряженные частицы, образованные потерей или усилением электронов, называются простыми ионами. Группы ковалентно связанных атомов, несущих заряды, называются многоатомными ионами. В глинистых минералах наиболее распространенными обменными катионами и анионами являются Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ , K^+ , NH_4^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{3-} и NO_3^- .

Термин «обмениваемые ионы» определяется не четко (Bohn и соавторы, 1985; Sposito, 1989). Под ним понимаются те ионы, которые высвобождаются из почвы растворами нейтральных солей в системе почва–вода. Растворимая соль может быть удалена только водой, которая также может удалить некоторые анионы из почв, но поскольку большинство почвенных коллоидов заряжены отрицательно, основной реакцией ионного обмена является обмен катионов почвы на катионы экстрагирующего раствора.

4.8.2.2. Механизмы ионообменной реакции

Принцип ионного обмена может быть проиллюстрирован на примере использования синтетических обменных силикатов (цеолитов) или пермутитов в умягчающих жестких водах (раздел 5.5). Это типичная иллюстрация, показывающая, как работает ионный обмен. Обычно натрий (Na) является обменным элементом активного пермутита (Z). Когда жесткая вода, жесткость которой обычно обусловлена растворимым кальцием (Ca) и магнием (Mg), проходит через смягчающий материал, кальций и магний поглощаются, а натрий высвобождается и переходит в раствор, как показано в следующей реакции:



где Na_2Z – цеолит натрия, а CaSO_4 – сульфат кальция.

Именно сульфат кальция в реакции вызывает жесткость воды. CaZ представляет собой кальций-цеолит или насыщенный кальцием пермутит, а Na_2SO_4 – сульфат натрия. Кальций является очень активным вытесняющим агентом, поэтому в разбавленном растворе вытесняет натрий пермутита. Многочисленные типичные примеры доступны в стандартных учебных пособиях

по химии, где они показаны как ионообменные реакции (Bohn и соавторы, 1985; Sposito, 1989).

4.8.2.3. Ионообменная емкость

Согласно Министерству сельского хозяйства США (USDA, 1938), а также работе Millar и Turk (1943), ИЕС почвы – это максимальное количество основания, которое почва способна адсорбировать из нейтрального раствора невалентного катиона, оно выражается в миллиэквивалентах на 100 г почвы (мэкв / 100 г). ASTM (D1129) утверждает, что ионный обмен является обратимым процессом, посредством которого ионы обмениваются между нерастворимым материалом и жидкостью без существенного структурного изменения материала. Существует две формы ИЕС.

1. *Объемный базис.* Объемный базис представляет собой количество миллиэквивалентов обменных ионов на миллилитр обратной промывки и осажденного слоя ионообменного материала в его стандартной форме.

2. *Массовая основа.* Массовая основа – это количество миллиэквивалентов обменных ионов на один грамм ионообменного материала в его стандартной форме.

4.8.3. Факторы, влияющие на ИЕС

К факторам, влияющим на ИЕС, относятся размер частиц, температура, концентрация поровой жидкости и условия окружающей среды. Эти факторы обсуждаются далее.

4.8.3.1. Размер частицы

Катионообменная емкость каолинита и иллита увеличивается с уменьшением размера частиц. Принято считать, что катионообменная емкость монтмориллонита существенно не изменяется с размером частиц. Эксперименты, отраженные на рисунке 4.7, показывают, что процент частиц менее, чем 0,005 мм лесса, увеличивается с увеличением ИЕС.

4.8.3.2. Удельная площадь поверхности

Чем меньше частица, тем больше удельная поверхность и больше ИЕС, как показано на рисунке 4.8. В большинстве глинистых минералов удельная поверхность превышает 50 м/г, а ИЕС превышает 18 мэкв / 100 г.

Измельчение вызывает изменение размера частиц, как сообщается в работе Kelley и Jenny (1936), на которую ссылается Kelley (1948). Уменьшение размера частиц вызывает увеличение поверхности и увеличение числа разорванных связей. Дальнейшее увеличение катионообменной способности каолинита после 96-часового измельчения незначительно, что указывает на то, что структура каолинита была разрушена в этот момент и появилась новая структура, подобная пермутиту.



Рисунок 4.7. Влияние размера частиц на ионообменную емкость (по CAS [1961], Research on Loess, Civil Engineering Research Report № 13, Chinese Academy of Science, Beijing, 157p.).



Рисунок 4.8. Удельная поверхность по сравнению с ионообменной емкостью (из: Fang, H. Y. [1997], Introduction to Environmental Geotechnology, CRC Press, Boca Raton, FL, 652 p.).

4.8.3.3. Температура или тепловая энергия

Kelley (1948) утверждает, что температурный эффект катионного обмена, как правило, невелик. Hofmann и Klemen (1950) пишут об изменении катионообменной емкости монтмориллонита, насыщенного ионами кальция (Ca^{2+}), ионами натрия (Na^{+}) и ионами лития (Li^{+}) при нагревании до различных температур. Обменная емкость уменьшается при нагревании, но снижение не является равномерным и изменяется в зависимости от присутствующего катиона (рис. 4.9). Это также показывает, что обменная емкость монтмориллонита в значительной степени снижается при нагревании до потери свойства набухания. В случае нерасширяющихся глинистых минералов имеются указания на то, что постепенное снижение катионообменной емкости происходит при повышении температуры нагрева.

4.8.3.4. Влияние размера ионов

Таблица 4.5 показывает относительные размеры основных ионов. Было обнаружено, что если ионы не различаются по размеру более чем на 15 % и по валентности не более чем на одну единицу (Paton, 1978), они могут замещать друг друга в силикатных минералах. Из таблицы 4.5 видно, что натрий (Na^{+}) и кальций (Ca^{2+}) или магний (Mg^{2+}) и двухвалентное железо (Fe^{2+}) могут полностью заменить друг друга.

4.8.3.5. Корреляция с другими параметрами

В разделе 3.7 указывалось, что соотношение кремнезема и полуторной окиси (SSR) является полезным параметром для идентификации и характеристики глинистых минералов. Этот SSR связан с ИЕС для некоторых естественных почв, показанных на рисунках 3.6 и 3.7, которые указывают, что SSR увеличивается с увеличением ИЕС для всех типов почв. Это также указывает на то, что катионообменная емкость связана с типами почв, что отражено в индексе пластичности (PI), как показано на рисунке 4.10. Линейная зависимость между этими двумя параметрами получается для большинства почв, за исключением монтмориллонита, поскольку монтмориллонит обладает уникальными свойствами, как обсуждалось в разделах 4.10 и 13.12.

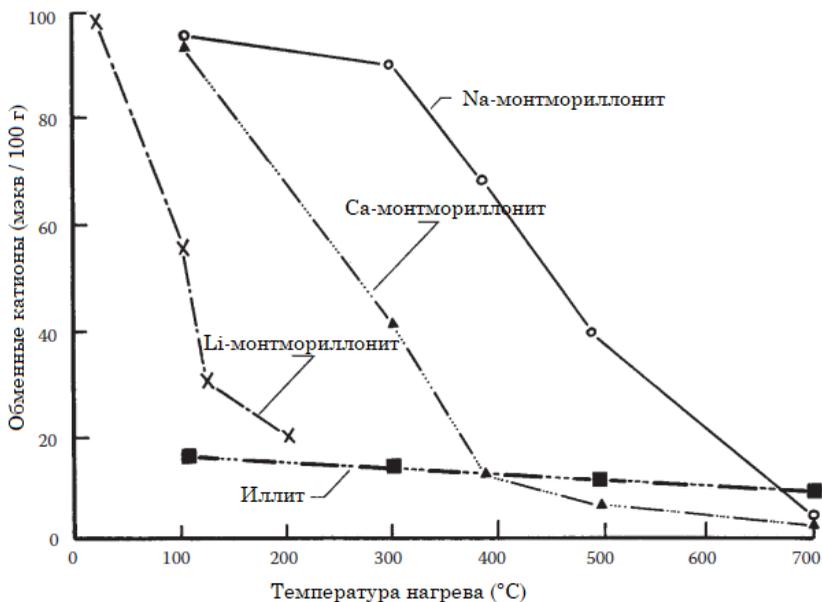


Рисунок 4.9. Влияние температуры на ионообменную емкость (данные из: Hofmann, U. and Klemen [1950]; цит. по: Grim R.E. [1968], Clay Mineralogy, 2nd ed. (1st ed., 1953), McGraw-Hill Book Co., New York).

Таблица 4.5. Относительный размер основных ионов

Элемент	Ионы	Относительный размер
Кислород	O^{2-}	1,40
Калий	K^{1+}	1,33
Кальций	Ca^{2+}	0,99
Натрий	Na^{1+}	0,97
Ион железа	Fe^{2+}	0,74
Магний	Mg^{2+}	0,66
Ион железа	Fe^{3+}	0,64
Алюминий	Al^{3+}	0,51
Кремний	Si^{4+}	0,42

Источник: данные из: Paton, T. R. (1978), The Formation of Soil Material, George Allen & Unwin Ltd., London.

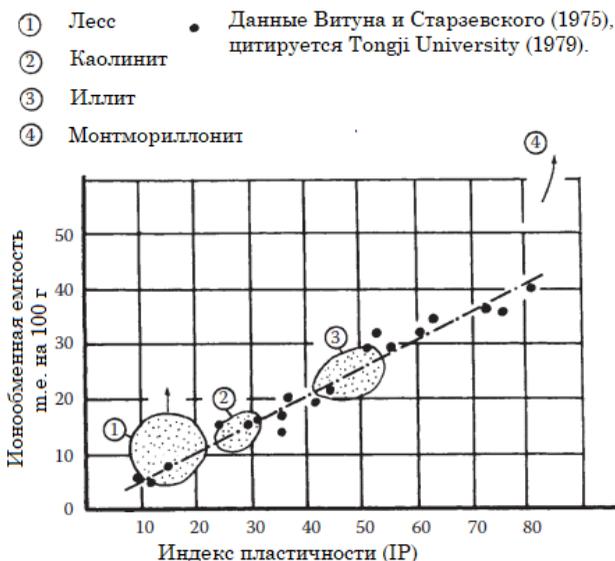


Рисунок 4.10. Ионообменная емкость против индекса пластичности (данные из: Fang, H. Y. [1997], Introduction to Environmental Geotechnolgy, CRC Press, Boca Raton, L, 652 p.).

4.8.4. Анионный обмен

Имеется много информации о катионном обмене; однако очень мало данных найдено об анионном обмене из-за сложной реакции во время обмена. Некоторые комментарии от различных исследователей (Kelley, 1948; Rich, 1968; Yu and Chiang, 1984) по этому аспекту представлены и кратко изложены далее.

1. Как катионы, так и анионы участвуют в реакциях почв с электролитами.

2. По мере увеличения pH, отрицательный заряд освобождается. Таким образом, задержка анионов уменьшается при увеличении pH.

3. Максимальный отрицательный заряд почв достигается после их фосфатирования и доведения до pH = 8,2. При определении чистого отрицательного заряда в почве, содержащей большое количество гидроксигрупп, необходимо определить удержание анионов, а также катионообменную емкость.

4. В почвах материал, лучше всего реагирующий с анионами, представляет собой аморфные Al и Fe водные оксиды или гидроксиды.

4.8.5. Ионообменная реакция в загрязненных почвенно-водных системах

4.8.5.1. Общее обсуждение

Ионный обмен обычно происходит в водной среде, и ионы обычно имеют значительную растворимость. Однако было показано, что глины могут забирать ионы из водных суспензий очень нерастворимых веществ и устойчивых

минералов посредством реакций ионной сорбции, и вполне вероятно, что реакция может происходить в суспензии высокой концентрации в ненасыщенных слоях почвы. В таблице 4.6 перечислены наиболее распространенные ионы, обнаруженные в системах почва–вода–загрязнитель.

Таблица 4.6. Наиболее распространенные ионы, обнаруженные в системах почва–вода–загрязнитель

Наиболее распространенные обменные ионы в почвенно-водной системе	
Вода	Почва
Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , H^+ , K^+ , CO_3^{2-} , Na^+ , HCO_3^- , Mg^{2+}	Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+ , K^+ , NH_4^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{3-} , NO_3^-
Общие ионы, найденные в загрязненных поровых жидкостях	
As, F, Pb, Cr, Hg, Cl, I, Br, NH_3 , H_2S , HNO_3 , H_3PO_4 , KBrO_3 , KBr	

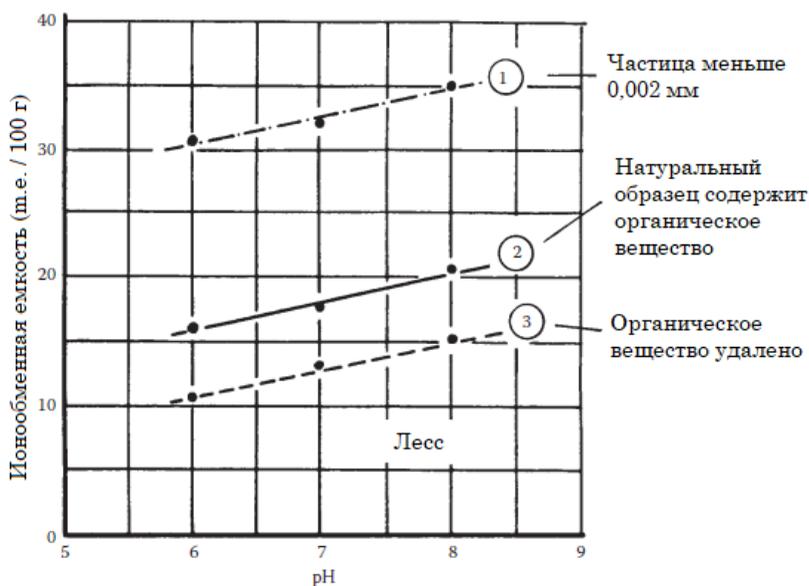


Рисунок 4.11. Значение pH влияет на ионообменную способность лесса (по CAS [1961], Research on Loess, Civil Engineering Research Report no. 13, Chinese Academy of Science, Beijing, 157 p.).

4.8.5.2. Ионообменная реакция между твердыми телами

В целом, катионный обмен был показан при данном наборе условий, но различные катионы не были в равной степени заменяемыми. Kelley (1948) показал, что ионный обмен может происходить непосредственно между корнями растений и глинами без промежуточного раствора ионов. Катион перемещается непосредственно от глины к растению в обмен на другой ион, который перемещается непосредственно от растения к глине. Обнаружено, что насыщенные натрием глины (Na-глины) были способны принимать достаточно сульфата бария (BaSO_4), чтобы заполнить около пятой части обменных позиций глины.

4.8.5.3. Ионообменная реакция между фазами

Было показано, что катионообменная реакция может протекать в спирте и что Н-монтмориллонит будет реагировать с сухим газом NH_3 с образованием NH_4 -монтмориллонита. Влияние значения pH на ИЕС лесса показано на рисунке 4.11. На рисунке 4.11 показано: когда pH увеличивается, ИЕС также увеличивается для всех трех случаев.

4.9. СИСТЕМА ГЛИНА–ВОДА–ЭЛЕКТРОЛИТ

4.9.1. Характеристики диффузного двойного слоя

В разделе 4.2 показано, что слой глины, состоящий из тетраэдрических и октаэдрических листов, часто несет отрицательный заряд в результате замещения некоторых катионов в структуре листа. Этот суммарный отрицательный заряд часто компенсируется катионами, расположенными на поверхностях слоя. Когда глина находится в присутствии воды, эти компенсирующие катионы имеют тенденцию диффундировать от поверхности слоя. Явление диффузии катионов от поверхности слоя в растворе называется диффузным двойным слоем, также называемым электрическим двойным слоем (рисунок 4.12).

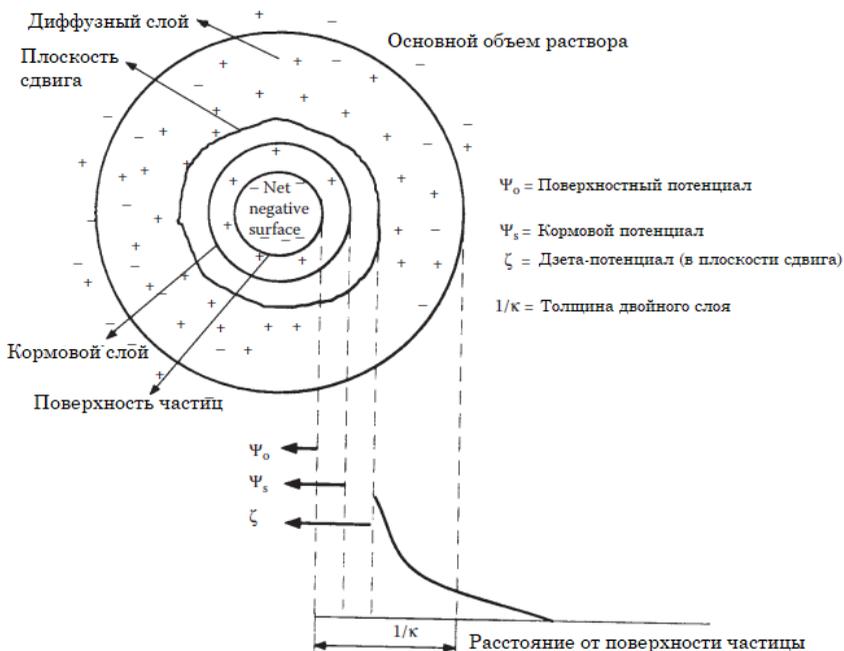


Рисунок 4.12. Схема, иллюстрирующая электрический двойной уровень и его дзета-потенциал (по Кауа, А. and Fang, Н. Y. [1996], ASTM STP 1282, pp. 303–314).

Диффузный двойной слой является основным признаком в системе глина–вода–электролит. Характеристики дзета-потенциала и другой терминологии будут обсуждаться в разделе 9.8.

Двойной слой имеет постоянный заряд, который определяется исключительно типом и степенью изоморфных замещений и результирующим чистым отрицательным зарядом в минеральных слоях. Понимание распределения ионов относительно поверхности слоя глинистого минерала основано на работах в области коллоидной химии. Было предложено несколько теорий для описания характеристик двойного слоя и их взаимодействия (Van Olphen, 1977; Mitchell, 1993). Наиболее часто используемая теория в геотехнической инженерии – теория Гуи–Чепмена (Gouy–Charman). Основные факторы, влияющие на толщину двойного слоя, суммированы, как показано в таблице 4.3. Дальнейшее обсуждение этого аспекта будет представлено в разделе 9.8.

4.9.2. Глиняная мицелла и ее структура

Глинистая мицелла является важной структурной единицей в водной суспензии глины и включает в себя твердую глинистую частицу, а также сферу ее влияния в окружающей воде или водном растворе (рисунок 4.13). Сфера влияния соответствует расстоянию, на котором обменные ионы, возникающие на

поверхности частиц, могут быть найдены в динамическом равновесии между силами электрического притяжения заряженных частиц и собственной кинетической энергией ионов, которые сами могут быть окружены сильно удерживаемыми молекулами воды.

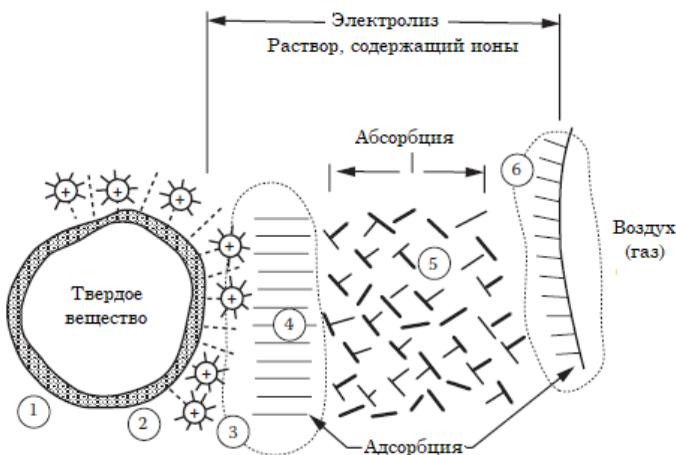


Рисунок 4.13. Взаимодействие почвы, воды и воздуха в окружающей среде (данные адаптированы из: Fang, H. Y. [1986], Proc. 1st Int. Symp. on Environmental Geotechnolgy, v. 1, pp. 1–14. Перепечатано с разрешения Envo Publishing, Вифлеем, Пенсильвания).

4.9.3. Свободная вода и экологическая вода

Вода, существующая в почве или водной системе, может быть разделена на две группы: свободная вода и вода из окружающей среды (Fang, 1987). Свободная вода, также называемая гравитационной водой, может быть удалена силой тяжести. Экологические воды состоят из двухслойной воды, гидратированной воды, воды для гидратации, осмотической воды и ориентированной воды (рисунок 4.13). На экологические воды сильное влияние оказывают местные условия окружающей среды, особенно в загрязненных почвенных и водных средах. Краткое обсуждение каждого типа окружающей воды представлено далее.

4.9.3.1. Адсорбированная вода

Частицы глины во влажных почвах всегда гидратированы. Поскольку частица окружена слоями молекул воды, она называется адсорбированной водой. Обмениваемые катионы – это положительно заряженные ионы из глинистой минералогической структуры, которые можно заменить.

4.9.3.2. Осмотическая вода

Обычная вода, расположенная между гидратированными ионами и между гидратированными минеральными поверхностями, с которых они выходят и чья сфера притяжения удерживается электростатическими силами, называется осмотической водой. Осмотическая вода обусловлена осмотической тенденцией катионов как можно больше диспергироваться в доступном пространстве растворителя, но сдерживается электростатическим притяжением к заряженным частицам глины.

4.9.3.3. Кристаллогидратная вода и гидратная вода

Частицы глины всегда окружены слоем молекул воды и связями воды с ионами или электрически заряженной поверхностью. Когда молекулы воды больше не способны удерживать всю тепловую энергию, ранее накопленную в системе, и разность выделяется в виде тепла раствора или теплоты смачивания в случае рассеивания твердых частиц, такую воду называют водой для гидратации (Winterkorn, 1942). Вода для гидратации удерживается только диссоциированными ионами обмена (Eucken, 1940).

Сильное связывание воды растворенными ионами может проявляться в сокращении объема, уменьшении удельной теплоемкости и уменьшении диэлектрической проницаемости воды-растворителя. Хотя причина этих явлений в основном носит электрический характер, наблюдаемые результаты в значительной степени зависят от размера и формы взаимодействующих ионов и молекул, а также от влияния некоторых анионов, которые уменьшают вязкость воды в растворителе.

4.9.3.4. Ориентированная вода

Ориентированная вода расположена на границе раздела воздух–вода, как показано на рисунке 4.13, и при нормальной температуре имеет толщину в несколько сотен молекул.

4.10. ХАРАКТЕРИСТИКИ И СТРУКТУРЫ НЕКОТОРЫХ ТИПИЧНЫХ МИНЕРАЛОВ ГЛИНЫ

4.10.1. Общее обсуждение

Основные структурные единицы почв обсуждались в разделе 4.2 и приводились на рисунке 4.1. Структурная классификация слоистых силикатов представлена в таблице 4.1. В основном выделяют три основных типа глинистых минералов: 1:1, 2:1 и 2:1:1; тем не менее они могут быть далее подразделены на

группы или подгруппы в зависимости, главным образом, от характера их октаэдрического листа (рисунок 4.1). С инженерной точки зрения общепризнаны три группы глинистых минералов: каолинит, иллит и монтмориллонит вместе с хлоритовой группой, как показано на рисунке 4.14. Дальнейшие обсуждения характеристик и структур некоторых распространенных минералов, относящихся к экологической геотехнологии, представлены далее.

4.10.2. Группы каолинита, монтмориллонита и иллита

4.10.2.1. Группа каолинита

Каолиновая группа состоит из глины, кристаллическая решетка которой жесткая, она содержит один лист кремнезема и один лист глинозема, известный как минералы 1:1. Идеализированной химической формулой этого минерала, представляющего собой двухслойную глину, состоящую из одного листа гиббсита (рис. 4.14 (1)), соединенного с тетраэдрическим листом кремнезема, является $(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}$. Алюминий занимает катионные центры в октаэдрическом слое; катионы тетраэдрического слоя – кремний. Поскольку межслойная связь представляет собой прежде всего водородную связь, межслойные силы притяжения являются существенными по сравнению с другими типами вторичной связи. Изоморфное замещение, замена катиона в идеальной структуре катионом, сходным по размеру и плотности заряда, как правило, очень низка в каолините. Минерологические анализы, измеряющие базальное расстояние структуры каолинита, расстояние от основания одного слоя до основания следующего или общую толщину слоя, составляют 7,2 Å. Катионообменная емкость каолинового глинистого минерала обычно составляет 3–15 мэкв / 100 г (таблица 4.4).

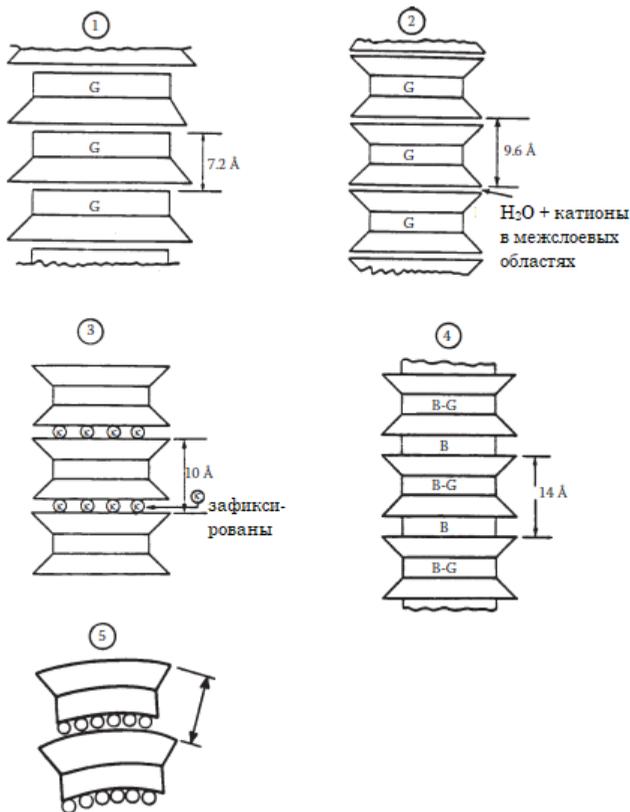


Рисунок 4.14. Схематическое изображение структур некоторых распространенных глинистых минералов: (1) каолинит; (2) монтмориллонит; (3) иллит; (4) хлорит и (5) галлуазит.

4.10.2.2. Группа монтмориллонита

В группе глиняных минералов 2:1 встречаются две общие группы минералов: группа смектита и группа иллита. Смектитовая группа глинистых минералов ранее была известна как монтмориллониты, но недавние исследования идентифицировали монтмориллонит как один из глинистых минералов, обнаруженных в группе смектитов. Монтмориллонит состоит из двух листов тетраэдра кремнезема с обеих сторон листа октаэдрического гиббсита. Идеализированной химической формулой этого минерала является $(\text{OH})_4\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20} \times n\text{H}_2\text{O}$, где $n\text{H}_2\text{O}$ – промежуточный слой (n-слой) адсорбированной воды. В действительности, монтмориллонит практически всегда демонстрирует некоторое ионное замещение, обычно натрием (Na) или кальцием (Ca). Na-монтмориллонит является распространенной формой бентонитовой глины (раздел 13.12). Монтмориллонит состоит из трех листов, уложенных друг в друга (рис. 4.14 (2)), так что связь между последовательными слоями состоит из сил Ван-дер-Ваальса.

Катионы могут присутствовать между слоями, чтобы уравновесить недостатки изменений, создаваемые ионными замещениями, главным образом, в октаэдрическом слое. Следовательно, эти межслойные связи относительно слабы и легко разделяются под воздействием напряжений, таких как адсорбция воды или других полярных жидкостей. Поскольку замещения решетки в основных слоях и катионов в промежуточном слое должны компенсировать недостатки заряда, катионообменная емкость является относительно высокой. Обычно считается, что катионообменная емкость монтмориллонита составляет от 80 до 150 мэкв / 100 г. Базальное расстояние, расстояние между слоями, может варьироваться от минимума 9,6 Å до полного разделения или бесконечности. Монтмориллонитовая глина считается более чувствительной к окружающей среде, чем каолинитовая или иллитовая группы.

4.10.2.3. Группа иллита

Иллитовая группа является промежуточной по своим свойствам и имеет гораздо более сложную химическую формулу. Иллиты также известны как слюдоподобные глинистые минералы. Они, как и монтмориллониты, представляют собой минералы 2:1. Иллиты состоят из листа гиббсита между двумя тетраэдрическими листами кремнезема, и последующие слои ионно связаны катионами калия, которые заполняют межслойную область. Следовательно, идеализированное химическое уравнение иллита представляет собой $(K, H_2O)_2(Si)_8(Al, Mg, Fe)_{4,6}O_{20}(OH)_4$. Октаэдрические катионы представляют собой алюминий, магний или железо, а тетраэдрические катионы могут представлять собой алюминий или кремний. Катионообменная способность иллитита обычно составляет от 10 до 40 по сравнению с 80–150 мэкв / 100 г для монтмориллонита и от 3 до 15 для каолинита (рис. 4.14 (3)).

4.10.3. Хлориты и галлуазиты

4.10.3.1. Хлориты

Хлориты широко распространены в почвах и являются примерами силикатов со слоем 2:1:1 (рис. 4.14 (4)). Элементный состав хлоритов варьируется в широких пределах. Они обычно встречаются в осадочных породах или морских отложениях. Хлориты в основном похожи на иллиты, за исключением того, что организованный октаэдрический слой хлоритов заменяет область, населенную катионами, в случае иллита. Идеализированной химической формулой является $(OH)_4(Si, Al)_8(Mg, Fe)_6O_{20}$ (для слоя 2:1) и $(Mg, Al)_6(OH)_{12}$ (для промежуточного слоя). Базальный интервал этого минерала, который имеет четыре слоя на слой, составляет 14 Å. Установлено, что катионообменная емкость варьируется от 10 до 40 мэкв / 100 г. Основной хлорит, включая несколько его разновидностей, довольно распространен.

4.10.3.2. Галлуазиты

Как указано в таблице 4.3, галлуазит представляет собой форму каолинита, в которой вода удерживается между структурными единицами в базисной плоскости. Данная форма состоит из кристаллов полых цилиндров, обычно

длиной 1 м и диаметром примерно от 1/5 до 1/10. длины. Галлуазит можно разделить на гидратированный и дегидратированный.

Гидратированный галлуазит ($4\text{H}_2\text{O}$) содержит мономолекулярный слой воды в своих минеральных слоях; когда эта вода полностью удаляется сушкой в печи, результатом является обезвоженный галлуазит ($2\text{H}_2\text{O}$). Пределы Аттерберга для двух галлуазитов различны, но оба графика представлены под линией А на графике пластичности Касагранде (рисунок 3.1). Гидратированный галлуазит, который также называют галлуазитом, может необратимо обезвоживаться до галлуазита, иногда известного как метagalлуазит. Минеральные структуры галлуазитов – как для гидратированного, так и для дегидратированного – показаны на рисунке 4.14 (5).

4.10.4. Геотехнические свойства глинистых минералов

Поскольку все природные почвы получены из этих основных глинистых минералов, необходимо оценить геотехнические свойства каждого отдельного минерала. В таблице 4.7 обобщены геотехнические свойства основных глинистых минералов.

Глина, в которой основным адсорбированным ионом является водород (H), называется водородной глиной или H-глиной. Если адсорбированный ион представляет собой натрий (Na^+), то это натриевая глина или Na-глина и т. д. Например, существует Na-монтмориллонит и Ca-монтмориллонит. Эти символы означают, что частицы монтмориллонитовой глины с катионами натрия (Na^+) и кальция (Ca^{2+}) соответственно адсорбируются на поверхности частиц. Следует отметить, что нет никакой гарантии, конечно, что все катионы, адсорбированные на внутренней поверхности глины, будут одного типа – только натрий или только кальций и т. д.

Если глина, имеющая адсорбированный ион одного вида, вступает в контакт с ионами другого вида, она может высвободить некоторые или все ионы первого типа и удерживать ионы второго типа на своих местах. Этот процесс называется базовым обменом, как описано в разделе 4.8. Другие геотехнические свойства этих глинистых минералов, такие как адсорбция воды, гидравлическая проводимость, уплотнение и прочность, будут обсуждаться в других главах.

Таблица 4.7. Сводка геотехнических свойств основных глинистых минералов

Свойства	Каолинит	Иллит	Монтмориллонит
Удельный вес, G_s	2,61	2,60	2,51
Верхний предел пластичности, LL	50–62	95–120	150–700
Предел пластичности, PL	33	45–60	55
Индекс пластичности, IP	20–29	32–67	100–650
Активность, A	0,2	0,6	1–6
Индекс сжимаемости, c_e	0,2	0,6–1,0	1–3
Сглаженный угол трения, степень	20–30	20–25	12–20
Форма частиц		Крупносланцеватый	
Удельная поверхность, m^2/g	10–20	65–100	50–800
Катионообменная емкость, мэкв / 100 г	3–15	10–40	80–150
Изоморфное замещение, (свойства / количество)	Al на Si 1 в 400	Al для Si 1 в 7 Mg, Fe на Al Fe, Al на Mg	Mg на Al 1 в 6
Связь между листами	Н-связь + вторичная валентность	Вторичная валентность + К-связь	Вторичная валентность + обменная ионная связь
Соотношение SiO_2 / R_2O_3 $R = Al + Fe$	2	2–3	4

4.11. ГИДРОФИЛЬНЫЕ И ГИДРОФОБНЫЕ ПОЧВЫ

4.11.1. Общее обсуждение

Вообще говоря, вся почва может быть разделена на две категории, а именно, гидрофильные (любят воду) и гидрофобные (не любят воду) почвы. В большинстве случаев почвы относятся к гидрофильному типу. Однако в этом разделе основное внимание уделяется тому, как эти два типа почв могут быть взаимосвязаны и как они могут быть использованы в экологических геотехнических проектах.

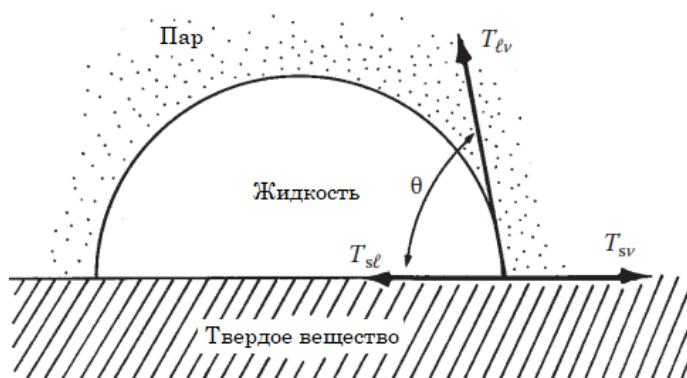
Некоторые гидрофобные почвы являются естественными, а некоторые – искусственными. Большая часть пустынных почв относится к гидрофобной группе. Этот тип почвы будет отталкивать воду быстрее, чем другие. Пустынные почвы не всегда встречались в природе, некоторые из них созданы человеком из-за плохого управления земельными ресурсами. Далее даны два различных подхода:

1) преобразование гидрофобного грунта в гидрофильный с целью превращения пустынного грунта (глава 18) в сельскохозяйственные угодья;

2) использование обратимых процессов превращения гидрофильной почвы в гидрофобную с целью использования ее в качестве глиняного вкладыша (глава 17).

4.11.2. Механизмы изменения гидрофобно-гидрофильных условий

Гидрофобный тип почвы бесполезен с сельскохозяйственной точки зрения, потому что эти почвы не могут впитывать воду. На рисунке 4.15 представлена диаграмма для иллюстрации капли воды при механическом равновесии на твердой поверхности. В почвах угол контакта жидкости с твердым веществом (θ) – это угол, образованный водным мениском, соприкасающимся со стенками твердой поры. Согласно данным De Vano и Letey eds. (1969), если угол (θ) больше 90° , вода не будет проникать или перемещаться через минеральную ткань почвы. С другой стороны, мы можем манипулировать изменением угла (θ), как показано на рисунке 4.15.



T_{sl} = Напряжение на границе раздела жидкость–пар

T_{lv} = Напряжение на границе раздела твердое тело – пар

T_{sv} = Напряжение на границе раздела твердое тело – жидкость

θ = Контактный угол жидкость – твердое тело

Рисунок 4.15. Взаимодействие пар–жидкость–почва (по De Vano, L. F. and Letey, J., eds. [1969], Proc. Symp. on Water-Repellant Soils, University of California at Riverside, 354 p.).

Gauffreau (1989) предложил метод нагревания, основанный на концепции, показанной на рисунке 4.15 (5), для превращения материала из гидрофильного в гидрофобный с целью использования гидрофобного материала в качестве глиняного футеровочного материала для систем контроля опасных или токсичных отходов (раздел 17.7). Техника нагрева используется для изменения угла (θ). Концепция водоотталкивания (гидрофобия) самими частицами почвы однозначно применяется к проблемам, связанным с локализацией отходов. Эта водоотталкивающая способность достигается за счет использования органического покрытия, которое для поддержания низкой стоимости этого

метода выбрано в качестве активного ила. Несколько методов нагревания используются для усиления гидрофобного эффекта, и проводятся различные испытания для определения степени водоотталкивания в каждом образце почвы.

4.11.3. Характеристика гидрофобных и гидрофильных почв

Основные различия характеристик между гидрофобными и гидрофильными почвами перечислены ниже.

1. Гидрофобная почва.

- Для стабильности требуется очень небольшое количество электролита.
- Частицы имеют заданный электрический заряд
- Миграция частиц находится под прикладным потенциалом
- Концентрация дисперсной фазы низкая

2. Гидрофильная почва.

- Для стабильности не требуется электролит; не осаждается небольшим количеством электролита
- Частицы могут быть положительными, отрицательными или нейтральными в зависимости от значения pH в растворе.
- Частицы могут или не могут мигрировать под прикладным потенциалом.
- Концентрация дисперсной фазы может быть высокой.

4.12. ГОМОИОННЫЕ МОДИФИКАЦИИ (ЧИСТАЯ ПОЧВА)

4.12.1. Общее обсуждение

Для технического применения связь между глинистой фракцией и инженерным поведением почв зависит не только от ее количества и физико-химических свойств ее мицелл, но также от относительных количеств и характеристик других компонентов почвы, включая водную и газообразную фазы, с которыми частицы глины взаимодействуют. Чтобы проиллюстрировать влияние глины на физико-химические свойства естественной почвы, в Принстонском университете была проведена серия экспериментов. Цели гомоионных модификаций:

- 1) помочь в распознавании, понимании и разделении компонентов, составляющих технические свойства глин и глинистых грунтов;
- 2) обеспечить определенные физико-химические свойства чистых глин и их гомоионных вариантов, которые могут быть сами по себе полезны для определенных конкретных инженерных целей;
- 3) определить вероятные диапазоны конкретных инженерных свойств в тех случаях, когда конкретные данные отсутствуют.

4.12.2. Способ приготовления образцов гомоионных почв

Гомоионные модификации из естественной почвы были подготовлены группами исследователей с использованием метода, описанного Scheffer и Schachtschabel (1959) и модифицированного Veess и Winterkorn (1967). Краткое описание процедур представлено ниже.

1. Был приготовлен 10-литровый водный раствор, содержащий в десять раз больше катионов, необходимых для ионного обмена в форме растворимой соли.

2. Растворы помещали в чашу миксера вместе с лопастью, предварительно покрытой химически инертной пленкой синтетической смолы.

3. Порошкообразную глину медленно добавляли во время работы смесителя, и полученный дисперсный раствор перемешивали в течение двух дней; затем его поместили в контейнер и оставили как минимум на семь дней.

4. Далее прозрачный раствор надосадочной жидкости декантировали, а дисперсию или пасту концентрировали и промывали либо в фильтр-прессе, либо с помощью больших воронок Бюхнера, соединенных с вакуумом.

5. Фильтр часто тестировался на содержание анионов, и процесс считался завершенным, когда присутствие соответствующего аниона не было обнаружено соответствующим химическим методом.

4.12.3. Типичные данные гомоионной модификации

Обширные лабораторные эксперименты по гомоионным модификациям описал Winterkorn (1942). Физические свойства, включая теплоту смачивания нескольких природных и гомоионных почвенных материалов, обобщены Winterkorn и Fang (1975). Сокращенная форма этих данных представлена в таблице 4.8. Рисунок 4.16 представляет собой графическое представление данных из таблицы 4.8. Это указывает на то, что гомоионные модификации могут существенно изменить инженерные свойства для данного природного грунта. Высокий предел усадки в сочетании с высокой температурой смачивания указывает на то, что почва особенно ценна для гашения и потери устойчивости при контакте с водой в сухом состоянии.

Таблица 4.8. Физические свойства некоторых типичных природных и гомоионных почв

Тип почвы	Натуральная почва	Гомоионная почва							
		H	Na	K	Mg	Ca	Ba	Al	Fe
Подпочва путнам									
Индекс пластичности	17	16	32	18	22	21	19	15	16
% глины (> 0,005 мм)	33								
Активность	0,52	0,48	1,00	0,55	0,67	0,64	0,58	0,45	0,48
Подпочва лесс пампанею									
Индекс пластичности	45	27	37	20	34	29	34	32	26
% глины (> 0,005 мм)	50								
Активность	0,90	0,54	0,74	0,40	0,68	0,58	0,68	0,64	0,52
Подпочва маршал									
Индекс пластичности	28	21	48	18	36	30	28	21	17
% глины (> 0,005 мм)	37								
Активность	0,76	0,57	1,30	0,49	0,97	0,81	0,76	0,57	0,46
Надпочва лесс пампанею									
Индекс пластичности	13	6	12	–	12	12	9	7	6
% глины (> 0,005 мм)	27								
Активность	0,48	0,22	0,44	–	0,44	0,44	0,33	0,26	0,22
Подпочва сесил									
Индекс пластичности	13	6	12	–	12	12	9	7	6
% глины (> 0,005 мм)	27								
Активность	0,48	0,22	0,44	–	0,44	0,44	0,33	0,26	0,22

Источники: Data selected from Winterkorn, H. F. (1942), Soil Sci., v. 54, pp. 259–273; Winterkorn, H. F. and Fang, H. Y. (1991), Foundation Engineering Handbook, 2nd ed. (1st ed., 1975), Van Nostrand Reinhold Co., New York, pp. 88–143.

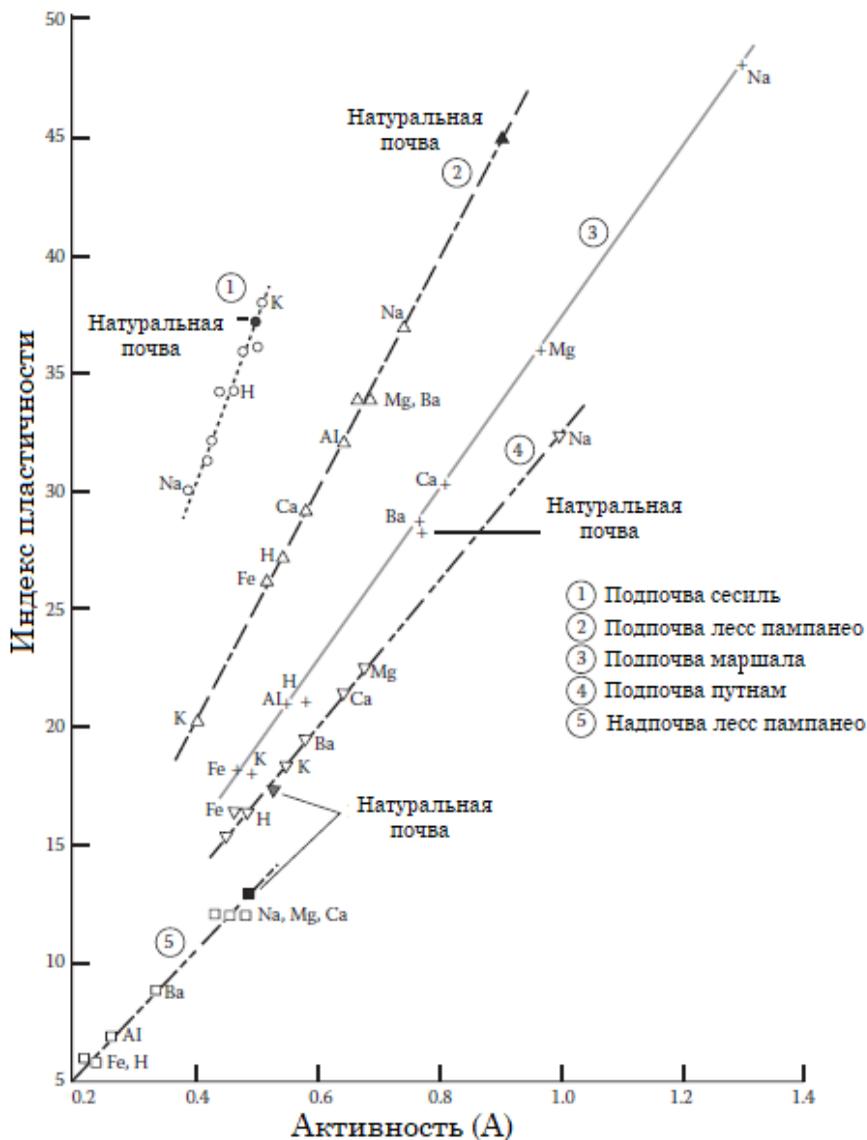


Рисунок 4.16. Взаимосвязи активности других физических свойств природных и гомоионных почв.

4.13. АНТРОПОГЕННАЯ ПОЧВА

4.13.1. Общее обсуждение

Почва как природное вещество вместе с воздухом и водой необходима для выживания человека. Почва используется не только для сельского хозяйства, но и в качестве основного строительного материала. Почва отбирается у природы любым способом такой, какой ее создала природа. Во многих случаях почва, взятая у природы, не совсем подходит для определенных строительных целей; следовательно, нередко случаются преждевременные или прогрессирующие сбои. В этом исследовании предлагается метод, который инженеры могут использовать для принятия решения о том, какой тип почвы необходим для конкретной цели. Принцип искусственной почвы основан на генетических характеристиках почвы. Воздействуя на содержание ионов в почве, можно изменить ее поведение.

4.13.2. Концепция антропогенной почвы и подход к ней

Концепцию искусственной почвы и подход к ней предложил Fang (1992b). Речь идет о методе преобразования естественной почвы в искусственную путем манипулирования ее ионным содержанием, чтобы изменить его технические характеристики, как показано на рисунке 4.17. Этот процесс преобразования включает в себя извлечение отдельных или гомогенных ионов (можно назвать их генами) из естественной почвы. Эта извлеченная почва называется гомоионной почвой или чистой почвой, как отмечалось в разделе 4.12.

Подход основан на контроле замещения ионов или манипулировании (добавлении или удалении) ионами в почве в соответствии с техническими потребностями. Рисунок 4.18 является упрощенной версией рисунка 4.17 и предполагает, что природная почва содержит различные типы ионов, как показано в таблицах 3.11 и 3.12.

Лабораторные исследования проводились с использованием типичных глинистых минералов и природных почв. Обычные геотехнические испытания проводятся на каждой из ионно-модифицированных почв (чистых почв), а также естественных почв, и проводится сравнение их инженерных свойств, чтобы сформировать руководящие принципы для выбора подходящих типов почв для конкретных проектов. Конкретные проекты, такие как опасные или токсичные средства контроля, гидравлические барьеры и верхние и нижние уплотнения, могут извлечь выгоду из такой модифицированной почвы. Кроме того, ее можно использовать для различных проектов по улучшению грунта, включая стабилизацию грунта и цементацию.

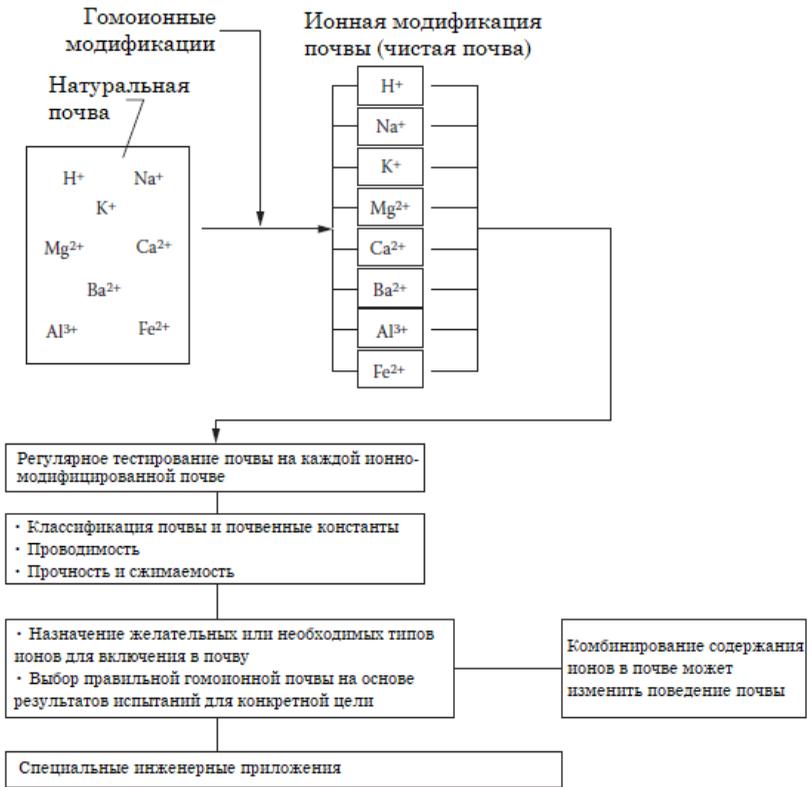


Рисунок 4.17. Концепция антропогенных почв и подходы к ней (по Fang, H. Y. [1992b], Topic 6, Geoenvironmental engineering, Recent Accomplishments and Future Trends in Geomechanics in the 21st Century, U.S. – Canada Workshop, University of Oklahoma and U.S. NSF, pp. 309–317. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в свободном доступе и не подлежит защите авторских прав).

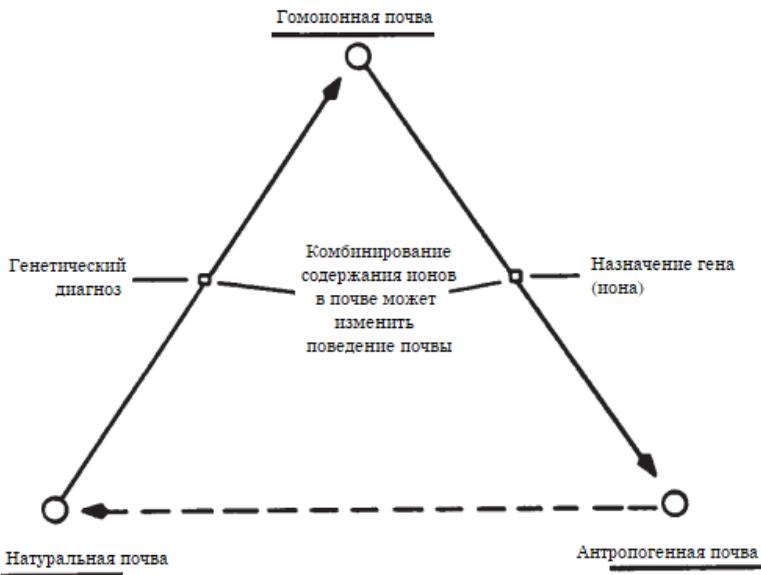


Рисунок 4.18. Процесс образования антропогенной почвы

4.14. РЕЗЮМЕ

1. Чтобы понять экологические аспекты взаимодействия почвы и воды в окружающей среде, необходимо знание технологии почвы. Чтобы понять взаимосвязь между экспериментальными результатами и основным поведением глины в микроскопическом масштабе, необходимы знания химии, физикохимии и биологии. Эта информация обобщается и обсуждается.

2. Обсуждаются основные факторы, относящиеся к глинистым минералам, включая структуры слоистых силикатов, межчастичные силы, а также связи между частицами.

3. Ионообменные реакции и их применение в почвенно-водных системах обсуждаются вместе с различными факторами, влияющими на ИЕС.

4. Изучено поведение систем глина–вода–электролит. Характеристики диффузного двойного слоя и его использования также представлены.

5. Инженерные свойства некоторых типичных глинистых минералов обобщены и обсуждены.

6. Рассмотрены гидрофильные и гидрофобные почвы и искусственные почвы, а также возможности их применения, относящиеся к экологической геотехнологии.

ПРОБЛЕМАТИКА

4.1 Как можно отметить дисперсию размеров зерна? Назовите как минимум два способа. Дают ли вам эти методы хорошее представление о степени дисперсии? Почему степень рассеивания стоит знать?

4.2. График «больше чем», а не «меньше чем» используется на диаграмме частот кумулятивного размера зерна (рисунок 4.3). Что это меняет? Режимы частотного графика отображаются на кумулятивном частотном графике?

4.3. Используя символы для гиббсита, брусита и силикатного тетраэдра, нарисуйте общепринятую структуру для каолинита и монтмориллонита.

4.4. Для следующих изменений в системе почва–вода перечислите влияние на толщину двойного слоя.

а. Снижение pH.

б. Уменьшение размера привлекаемого катиона.

с. Уменьшение валентности привлекаемого катиона.

д. Увеличение концентрации ионов.

4.5. Какую структуру глины вы ожидаете для того, чтобы иметь наибольшее значение из следующих свойств почвы? (а) Проницаемость, (б) чувствительность, (с) отскок при снятии нагрузки, (д) прочность на сдвиг и (е) сжимаемость.

4.6. Имеется две частицы кварца одинакового размера, но не одинаковой формы. Первая частица имеет скорость осаждения 0,95 см/с, вторая имеет скорость осаждения 0,80 см/с. Какая частица имеет самую низкую сферичность? Что такое сферичность?

4.7. Объясните, почему площадь поверхности мелкозернистых частиц почвы так важна по сравнению с более крупными частицами почвы.

4.8. Что такое гомоионная модифицированная почва и что такое чистая почва?

4.9. Дайте комментарий об искусственной почве. Есть ли смысл разрабатывать такую почву для использования с системами контроля опасных или токсичных отходов?

4.10. Объясните характеристики и механизм водно-почвенного взаимодействия гидрофильных и гидрофобных почв.

5. Взаимодействие почва–вода–воздух в окружающей среде

5.1. ВВЕДЕНИЕ

5.1.1. Общее обсуждение

Вода имеет самое важное отношение ко всем строительным материалам. Она служит важным компонентом в гидравлических цементах и бетонах. Вода и водные растворы могут физически и химически взаимодействовать с материалами конструкций, предназначенных для их содержания или проведения, таких как системы водоснабжения и сантехники, включая плотины и трубопроводы, построенные из земли, бетона, дерева или металлов. Из-за своего повсеместного распространения (даже в пустынном воздухе) и своих физических и химических характеристик вода является одним из основных разрушающих агентов, воздействующих практически на все строительные материалы, используемые на Земле, и в значительной степени влияет или даже определяет их долговечность и условия эксплуатации. Очевидно, что чем лучше мы понимаем водное вещество, тем лучше мы можем оценить его влияние на строительные материалы. Если почва и вода загрязнены, то сложность каждой фазы умножается. Поскольку взаимодействие почв с водной средой является основной частью геотехнологии, мы должны приложить усилия, чтобы как можно лучше понять механизм их взаимодействия и реакцию на местную среду в течение срока полезного использования почвы.

5.1.2. Терминология увлажнения почвы

Исследователи в разных областях стали использовать различные термины для обозначения важных почвенно-водных систем. Рисунок 5.1 показывает приблизительное соотношение обычно используемых терминов, касающихся влажности почвы. Эта шкала, предложенная Olmstead и Smith (1938), с повышением содержания влаги вверх, не имеет вершины. Есть пять разделенных линий, отмеченных от А до Е. Краткое объяснение каждой точки представлено следующим образом.

5.1.2.1. Суспензии

Над точкой А находятся почвенные суспензии (раздел 3.10). Объем осадения обозначен точкой А, которая после осадения из суспензии занимает единицу массы почвы.

5.1.2.2. Гравитационная вода

От точки А до В находится область гравитационной воды. Максимальная влагоудерживающая способность составляет 1 дюймовый слой рыхлой почвы после того, как гравитационная вода дренируется из самых крупных пор. Минимальная насыщенность водой – это наименьшее содержание влаги, при котором почва может быть насыщена водой, когда зерна почвы упорядочиваются до наиболее плотной структуры.

5.1.2.3. Капиллярный диапазон

От точки В до С – диапазон капилляров. Напряжение капилляров варьируется от нуля в точке В до нескольких сотен фунтов на квадратный дюйм в точке С. В этой области следует отметить несколько важных терминов.

1. *Емкость поля*, представляющая максимальное количество воды, которое можно удерживать против силы тяжести (раздел 7.10).
2. *Эквивалент влаги* (раздел 6.5).
3. *Оптимальная влажность* (раздел 11.2).
4. *Предел усадки* (раздел 6.2).
5. *Коэффициент увядания* – это влажность, достаточно низкая, чтобы растения могли увядать. Точки, в которых почвы показывают едва заметное отличие цвета от сухого воздуха, указаны для справки.

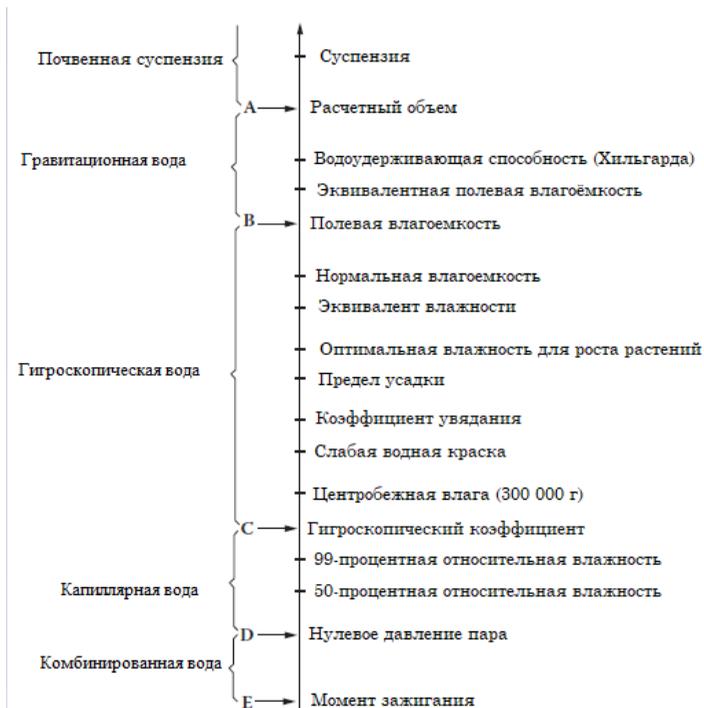


Рисунок 5.1. Шкала влажности почвы, показывающая приблизительное соотношение обычно используемых показателей влажности почвы (по Olmstead, L. B. and Smith, W. O. [1938], *Soils and Men, Yearbook of Agriculture*, U.S. Department of Agriculture, pp. 897–910).

5.1.2.4. Гигроскопический диапазон и момент зажигания

От точки С до D – гигроскопический диапазон. Коэффициент гигроскопичности отмечает верхнюю границу этого диапазона. Вода, оставшаяся после удаления полностью гигроскопичной воды, называется комбинированной водой. Она удерживается химическими, а не физическими силами и может быть удалена только нагревом. В точке зажигания – ярко-красный жар, и вся почвенная вода окончательно теряется. Поскольку растения не могут извлекать воду из

почвы при содержании влаги ниже точки увядания, количество воды в почве, превышающее коэффициент увядания, в любой момент времени называется доступной водой. Максимальная доступная вода – это разница между коэффициентом увядания и емкостью поля, как показано на рисунке 5.1.

5.1.3. Почвенно-водная система и ее измеримые параметры

Взаимодействие почвы и воды является сложным процессом, и его поведение зависит не только от типов почвы и ее происхождения, но также от условий окружающей среды и истории стресса. В геотехнической инженерии механизм взаимодействия почвы и воды, связанный со стабильностью почвенной массы, имеет существенное значение при прогрессирующем разрушении и эрозии, ползучести поверхности, оползнях и т. д. На рисунке 5.2 обобщены факторы окружающей среды, влияющие на взаимодействие почвы и воды, и их измеримые параметры. В этой главе, посвященной взаимодействию почвы и воды, будут рассмотрены механизмы их взаимодействия как в области тепловой, так и электрической энергии.

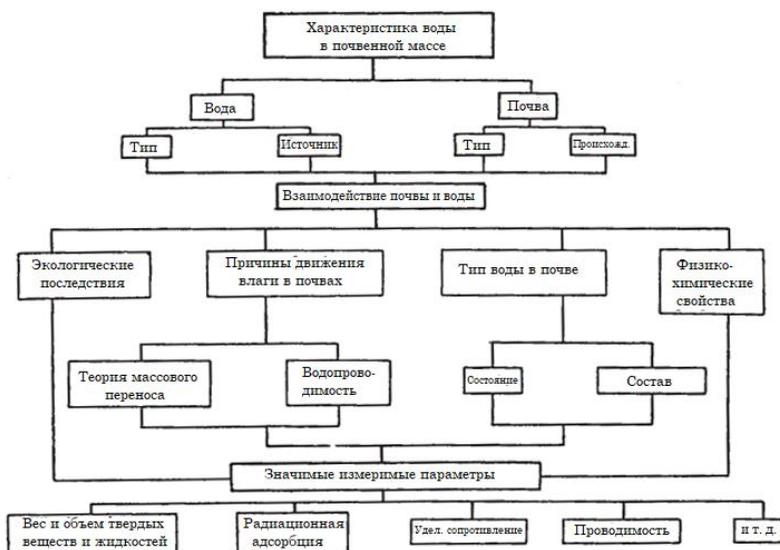


Рисунок 5.2. Взаимодействие почвы и воды и его измеримые параметры.

5.2. ПРИРОДА ВОДЫ

5.2.1. Молекулярные размеры и объемные свойства

Вода – это своеобразное вещество; она должна быть газом при нормальных условиях давления и температуры по аналогии с сероводородом (H_2S), селеном водорода (H_2Se) и теллуrom водорода (H_2Te), но это жидкость, и даже как жидкость она имеет определенную «твердую» структуру, как показали

рентгенограммы. Эти особенности, которые наблюдаются в чистой объемной воде, также проявляются во взаимодействиях с другими веществами, такими как растворенные ионы, полярные и неполярные вещества, а также с контактирующими поверхностями. Эти взаимодействия приводят к эффектам, которые наблюдаются на различных размерных уровнях, таких как молекулярный, коллоидный, микроскопический и макроскопический или нормальный визуальный уровень.

Чистая вода – бесцветная жидкость без запаха и вкуса, которая кипит при 100°C и замерзает при 0°C. Наименьшей структурной единицей водного вещества является молекула H₂O. Она состоит из двух H-атомов и одного O-атома и может быть обозначена как оксид водорода и гидрид кислорода или гидроксид водорода. Ее молекулярная масса равна сумме составляющих ее атомов, то есть 2(1,0081) + 16,00, что ставит ее в число шести самых легких молекул, известных химикам.

Молекула воды НОН может рассматриваться как приблизительно сферическая с радиусом около 1,38 Å, в то время как у иона O²⁻ 1,32 Å. Ионы H⁺ расположены на поверхности иона O²⁻ так, что образуют угол около 105° с центром O²⁻. Такое расположение дает молекуле воды двустороннюю симметрию и постоянный диполь 1,87×10 esu-см. (esu = электростатическая единица). Эта двусторонняя электрическая структура и дипольный момент являются основными причинами специфической природы водного вещества. Они приводят к сильному и прямому взаимодействию между соседними молекулами воды, и это из-за направленных характеристик делает невозможным плотное упорядочение молекул воды.

5.2.2. Характеристики структуры воды

Как указывалось ранее, из-за сильного и прямого взаимодействия между отдельными молекулами воды они не могут быть плотно упорядочены. Следующий пример используется для дальнейшего объяснения характеристик структуризации молекул воды.

Пример 5.1

Вычислить абсолютный объем воды.

Решение

Если предположить, что молекулы воды являются однородными сферами, то 1 г-моль воды, то есть 18 г или $6,02 \times 10^{23}$ молекул, имеет фактический объем твердого вещества:

$$6,02 \times 10^{23} \times (1,38)^3 (4/3) \pi = 6,62 \text{ см}^3$$

В различных возможных формах пространственной симметричной структуры таких сфер мы получаем следующие значения для объемов, занимаемых 1 г-моль такой сферы:

- абсолютный объем твердого вещества – 6,62 см³
- гексагональная ромбоэдрическая структура – 8,94 см³
- тетрагональная сфероидальная структура – 9,49 см³
- орторомбическая структура – 10,92 см³
- кубическая структура – 12,64 см³
- нормальная вода – 18,00 см³
- лед – 19,65 см³

Данные в примере 5.1 показывают слабость структур воды и льда, которые содержат только 36,8 и 33,7 % фактического водного вещества на единицу объема. Эта слабость вызвана низким порядком симметрии поля электрических сил молекулы воды в сочетании с сильным взаимодействием между молекулами воды, если они расположены в соответствии с их электрическими структурами. Какова величина притяжения между водными диполями и как она сравнивается с соответствующей величиной у других молекулярных или ионных взаимодействий или связей, в настоящее время не совсем понятно. Энергия связи молекулы воды обсуждалась ранее в разделе 4.2.

5.2.3. Химический состав воды

Краткое обсуждение характеристик жидкой фазы почвы было представлено в разделе 3.2. Дальнейшие обсуждения химического состава воды и связанных с ней явлений представлены ниже. Молекулы воды не только объединяются в более крупные структурные единицы, но также диссоциируют на ионы H^+ , OH^- и O^{2-} . Хотя степень этой диссоциации очень мала, она имеет большое теоретическое и практическое значение для чистой воды, а также для загрязненной воды, которая содержит водные растворы кислот, оснований и солей. Более высокие концентрации H^+ обусловлены обменными ионами H в частицах почвы и/или присутствием минеральных или органических кислот. Типичные характеристики химического состава воды показаны на рисунке 5.3. Природная вода может содержать более 60 известных химических элементов. Частичный список приведен в таблице 5.1 для морской и речной воды.

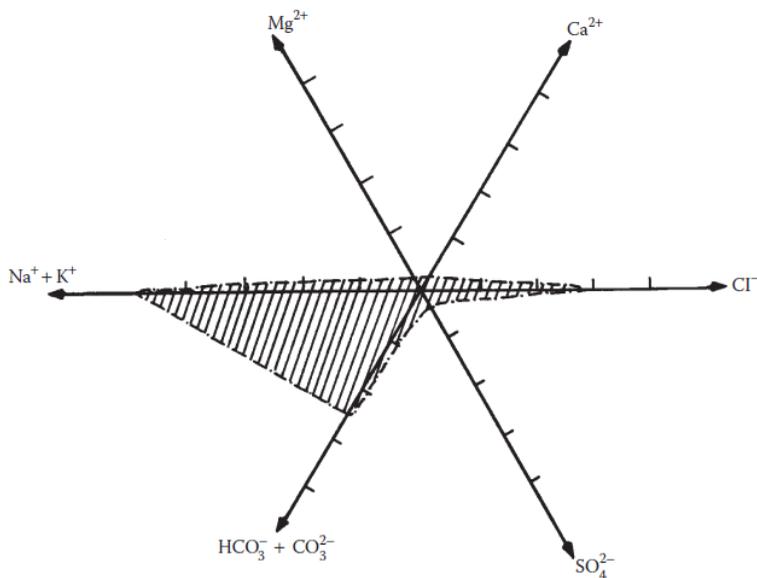


Рисунок 5.3. Типичные характеристики химии воды (данные выбраны из: Petroleum Geology [1979], Beijing, p. 26 and 29. [На китайском]; Wang [1985], Water Pollution, Scientific Publ., Beijing, 267p. [На китайском]).

Таблица 5.1. Сравнение основных химических составов морских и речных вод

Элементы	Морская вода (ppb)	Речная вода (ppb)
Al	1,0	400
B	4,450	10
Br	67,300	20
Ca	$4,11 \times 10^5$	15,000
Cl	$1,94 \times 10^7$	7,800
Fe	3,4	670
I	64	7,0
K	$3,92 \times 10^5$	2,300
Li	170	3
Mg	$1,29 \times 10^6$	4,100
Na	$1,08 \times 10^7$	6,300
Pb	0,3	3,0
S	$9,04 \times 10^5$	5,600
Sr	8,100	70
U	3,3	0,3
Zn	2,0	20

Источник: данные из: Wang, C. H. (1985), Water Pollution, Scientific Publishing, Beijing.

5.3. СВОЙСТВА ВОДЫ И ВОДНЫХ ВЕЩЕСТВ

5.3.1. Плотность, удельный вес и специальные характеристики воды

5.3.1.1. Плотность и удельный вес

Плотность определяется как масса на единицу объема: килограммы на кубический метр ($\text{кг}/\text{м}^3$) или граммы на кубический сантиметр ($\text{г}/\text{см}^3$). Удельный вес – фунт за кубический фут (pcf), он определен как единица силы тела или сила за единицу объема. В системе СИ эта единица будет выражена как Ньютон на кубический метр ($\text{Н}/\text{м}^3$). Плотность воды при 4°C составляет 62,4 pcf или 1,94 слагов на куб. фут. В метрической системе она равна $1 \text{ г}/\text{см}^3$ или, для системы СИ, равна $9,807 \text{ кг}/\text{м}^3$. На рисунке 5.4 показано соотношение между удельным весом и температурой чистой воды.

5.3.1.2. Удельный вес

Удельный вес вещества – это отношение его плотности к плотности воды при 4°C . Разумеется, удельный вес – это чистое число. Удельный вес материала определяется как вес материала на единицу объема и, следовательно, выражается в единицах силы, деленной на объем, или силы, деленной на длину в кубе в системе фут–фунт–секунда (фут/с), которая выражается в фунтах на кубический фут (pcf).

5.3.2. Поверхностное натяжение

Молекулы на поверхности жидкости притягиваются друг к другу; следовательно, очевидно, что растягивающее усилие может рассматриваться как действующее поперек любой линии на поверхности жидкости. Интенсивность молекулярного натяжения на единицу длины вдоль любой линии на поверхности жидкости называется поверхностным натяжением. Есть несколько методов для измерения поверхностного натяжения воды или жидкости, как предложено ASTM

(D1590). Числовое значение поверхностного натяжения жидкости зависит от природы самой жидкости, типа соседней жидкости и температуры. Значение поверхностного натяжения уменьшается с ростом температуры. Единицей поверхностного натяжения в системе СИ является N_m , а обычно используемая единица измерения в cgs – дин/см ($1 N_m = 10 \text{ дин/см}$). Типичное значение для воды при 20°C составляет $75,8 \text{ дин/см}$. В таблице 5.2 представлены типичные данные о поверхностном натяжении в различных интерфазах. Помимо поверхностного натяжения жидкости, Gilbert (1960) разработал прибор для измерения натяжения в воде.

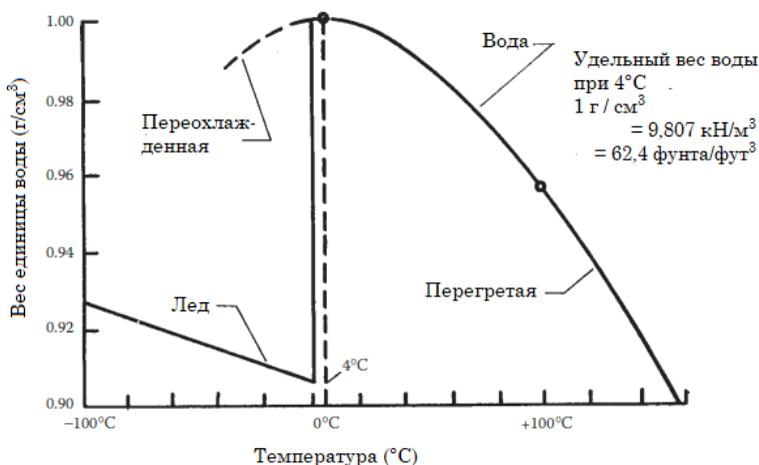


Рисунок 5.4. Влияние температуры на единицу веса чистой воды (данные из: Rao [1933], Nature, v. 132, no. 3334, Sept. 23, p. 480).

Таблица 5.2. Типичные данные о поверхностном натяжении на различных интерфазах

Граница раздела	Температура ($^\circ\text{C}$)	Поверхностное натяжение (дин/см)
Ацетон–воздух	20	23,7
Бензол–вода	20	35,0
Четыреххлористый углерод – воздух	20	27,0
Этиловый спирт – воздух	20	22,7
Глицерин–воздух	20	63,4
Ртуть–воздух	15	487,0
Вода–воздух	0	75,6
Вода–воздух	20	72,8
Вода–воздух	100	58,9

Источник: данные из: Sears, F. W. and Zemansky, M. W. (1955), University Physics, Addison-Wesley, Cambridge, MA; Hough, B. K. (1957), Basic Soils Engineering, The Ronald Press Co., New York.

5.3.3. Вязкость воды и других поровых жидкостей

5.3.3.1. Абсолютная или динамическая вязкость

Вязкость жидкости используется в качестве показателя относительной текучести по сравнению с идеальной жидкостью и идеальным твердым

веществом. Идеальная жидкость – ноль, а идеальное твердое вещество – бесконечность. *Вязкость* жидкости определяется как отношение напряжения сдвига к скорости деформации сдвига. Напряжение сдвига – это сила сдвига, деленная на площадь сдвига. Скорость деформации сдвига – это изменение скорости, деленное на расстояние между поверхностями сдвига. Вязкость, определяемая в таких условиях, называется *абсолютной* или *динамической вязкостью* (μ). На рисунке 5.5 показано влияние температуры на динамическую вязкость различных широко используемых жидкостей.

Динамическая или абсолютная вязкость может быть выражена в фунтах-секундах на квадратный фут (фунт-с/фут²) или слагах на фут-секунду. В метрической системе она может быть выражена в дин-секундах на квадратный сантиметр, грам-секундах на квадратный сантиметр или в пуазах. Термин пуаз введен в честь французского ученого Пуазейля. Сантипуаз, или 0,01, является общей единицей. Обычно используемые единицы для динамической или абсолютной вязкости перечислены ниже:

- 1 дин-с на см² = 1,0 Па·с
- 1 г/см² = 980,7 Па·с
- 1 фунт-с на фут² = 478,7 Па·с
- 1 пуаз = 1000,0 мПа·с

5.3.3.2. Кинематическая вязкость

Кинематическая вязкость (ν) – это отношение абсолютной вязкости, деленное на плотность жидкости. Для кинематической вязкости, единицы могут быть выражены через квадратные футы в секунду или квадратные сантиметры в секунду. В честь сэра Джорджа Стоукса, английского ученого, 1 м²/с называется стоком. Преобразования между английской и метрической системами для динамической и кинематической вязкости показаны в примере 5.2.

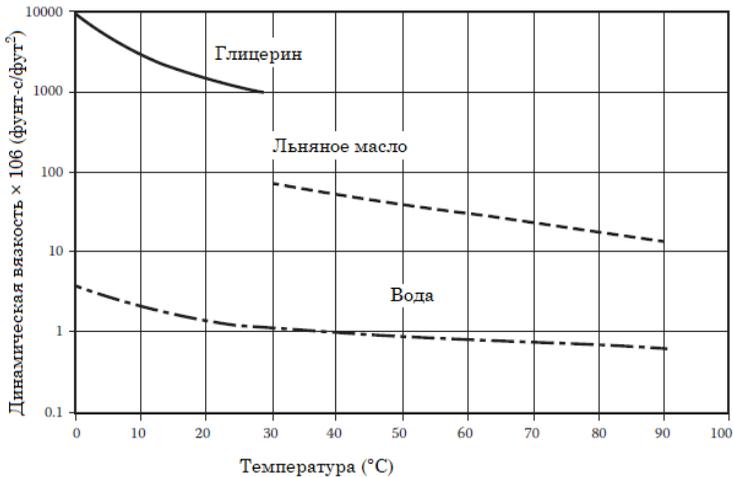


Рисунок 5.5. Динамическая вязкость от температуры некоторых обычно используемых жидкостей (1 фунт-с/фут² = 478,7 Па·с) (Данные из: Brady, G. S. [1947], Material Handbook, McGraw-Hill, New York; и другие).

Пример 5.2.

(а) Перевести единицы вязкости из пуазов в слагив в секунду и из фунтов в секунду на квадратные футы в пуазы.

(б) Перевести 1 сток в квадратный фут в секунду или квадратный фут в секунду в стоки.

Решение

(а) 1 дюйм = 2,54 см; 1 дин = $2,248 \times 10^{-6}$ фунтов, затем

$$1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 1 \frac{\text{дин} \cdot \text{с}}{\text{см}^2} \\ = (2,248 \times 10^{-6}) (2,54 \times 12)^2 \text{ фунт} \cdot \text{с} / \text{фут}^2$$

следовательно,

$$1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 2,088 \times 10^{-3} \text{ фунт} \cdot \text{с} / \text{фут}^2$$

$$= 2,088 \times 10^{-3} \text{ слагив} / \text{фут} \cdot \text{с} \text{ или}$$

$$1 \text{ фунт} = 454 \text{ г}; \text{ g} = \text{сила тяжести} = 980 \text{ см} / \text{с}^2;$$

$$1 \text{ фут} = 30,48 \text{ см, затем}$$

$$1 \frac{\text{фунт} \cdot \text{с}}{\text{фут}^2} = \frac{(454)(980)}{(30,48)^2} \times 1 \frac{\text{дин} \cdot \text{с}}{\text{см}^2} = 479 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

(б) По определению: 1 сток = $1 \text{ см}^2 / \text{с}$

$$1 \text{ см}^2 = 1,076 \times 10^{-3} \text{ фут}^2, \text{ затем}$$

$$1 \text{ сток} = 1,076 \times 10^{-3} \text{ фут}^2 / \text{с} \text{ или}$$

$$1 \text{ фут}^2 / \text{с} = (30,48)^2 (1 \text{ см}^2 / \text{с}) = 929,03 \text{ стока}$$

5.3.4. Диэлектрическая постоянная воды

Диэлектрическая проницаемость (ϵ) является мерой способности материала выступать в качестве изолятора. То есть это мера способности материала уменьшать напряженность поля электрической энергии. Чем выше диэлектрическая проницаемость материала, тем больше материал ведет себя как изолятор. Диэлектрическая проницаемость воды очень высока по сравнению с другими жидкостями. Высокая диэлектрическая проницаемость воды является причиной ее большой растворяющей способности для сильных электролитов. Дальнейшее обсуждение диэлектрической проницаемости включает методы измерения, типичные данные и корреляцию с другими параметрами почвы, и они будут представлены в разделе 9.4.

5.4. РАСТВОРЫ, СОЕДИНЕНИЯ, СМЕСИ И ЭЛЕКТРОЛИТЫ

5.4.1. Растворы, растворители и растворенные вещества

5.4.1.1. Растворы

Растворы представляют собой смеси веществ, которые растворяются друг в друге, превращаясь в однофазные смеси. Растворы могут быть ненасыщенными, насыщенными или перенасыщенными, в зависимости от количества растворенного вещества в растворителе. Растворы также называют разбавленными или концентрированными, в зависимости от количества растворенного в данном количестве растворителя.

5.4.1.2. Растворитель и растворенное вещество

Растворитель – это вещество, обычно жидкость, в которой растворяется другое вещество, называемое растворенным веществом. Растворимость – это количество растворенного вещества, которое растворяется в данном количестве растворителя. Концентрация раствора выражает количество растворенного вещества относительно количества растворителя или раствора. Количественное выражение концентрации раствора представляет собой отношение двух измерений:

$$A = B / C \quad (5.1)$$

или же

$$A = B / D \quad (5.2)$$

где A – концентрация раствора, B – количество растворенного вещества, C – количество растворителя, D – количество раствора.

Для указания концентрации обычно используются три единицы: (1) весовой процент, (2) мольная доля и (3) молярность. Краткое описание каждого термина вместе с общими единицами, часто используемыми для описания характеристик растворов, соединений и смесей, приведено ниже.

1. *Моль*. Моль или химический моль – это количество вещества в граммах, которое содержит столько химических частиц, сколько атомов углерода содержится в 12 г углерода-12. Химические частицы должны быть указаны и могут быть атомами, молекулами или ионами или любыми конкретными группами таких объектов.

2. *Молярность (M)*. Молярность определяется как число молей растворенного вещества на литр раствора. Концентрации раствора могут быть выражены через количество растворенных частиц (молей), которые будут присутствовать в каждом литре раствора, как показано в примере 5.3.

3. *Части на миллион (ppm)*. Растворенные вещества, обнаруженные в очень низких концентрациях в растворах, иногда выражаются в виде количества миллиграммов растворенного вещества на килограмм раствора или количества миллиграммов растворенного вещества на литр раствора.

4. *Эквивалент на миллион* (ерм). Это единица химического эквивалентного веса растворенного вещества на миллион единиц веса раствора (ASTM D1129).

Пример 5.3

Раствор содержит 117 г хлорида натрия (NaCl), растворенного в воде, чтобы получить 2,0 л раствора. Используйте молярность (M), чтобы выразить такое решение.

Решение

(1) Определить количество молей NaCl.

Из приложения 2D: атомный вес Na = 23,0; Cl = 35,5; тогда
117 г / (23,0 + 35,5) г / моль NaCl = 2,0 моль NaCl

$$\begin{aligned} \text{(2) Молярность (M)} &= \frac{\text{Количество молей}}{\text{растворенного вещества}} \\ &= \frac{\text{Объем раствора в литрах}}{\text{}} \\ &= \frac{2,0 \text{ моль NaCl}}{2 \text{ л}} \\ &= 1,0 \text{ моль NaCl / л} \end{aligned}$$

Примечание: химики используют молярность, обычно связанную с растворами. Концентрация часто выражается как 1,0 M NaCl, и это означает, что раствор содержит концентрацию хлорида натрия, так что каждый литр раствора будет содержать 1,0 моль хлорида натрия. При анализе загрязнения воды или загрязненной поровой жидкости и химической стабилизации или цементации эти единицы часто появляются в литературе.

5.4.2. Соединения и смеси

Соединения имеют определенные свойства и состав и являются гомогенными. При определенных условиях они могут быть разделены на два или более химических элемента. Вода (H₂O) состоит из двух химических элементов – водорода (H) и кислорода (O). Это соединение всегда содержит водород и кислород, и любой образец будет содержать 8 г кислорода на каждый 1 г водорода.

Если мы смешиваем сахар или соль с водой, получается соединение. Смеси такого рода кажутся гомогенными, но не имеют определенного состава. Смеси сахара и воды или смеси соли и воды могут содержать различные количества сахара в воде или соли в воде. Когда такие переменные составы встречаются, они называются смесями. Раствор классифицируется как смесь.

5.4.3. Электролиты

Вещества, которые образуют ионы в водном растворе, называются электролитами. Некоторые вещества, которые полностью ионизируются,

называются сильными электролитами. Другие ионизируются незначительно и называются слабыми электролитами. В дальнейшем обсуждении мы будем классифицировать вещества как сильные или слабые электролиты.

1. *Соли.* Все соли являются сильными электролитами. Например, KBr , $NaCl$, NH_4NO_3 , $CaCl_2$ и Na_2CO_3 являются сильными электролитами. Некоторые соли, такие как $AgCl$, не дают растворов с высокой проводимостью, потому что они имеют очень низкую растворимость.

2. *Основания.* Все растворимые гидроксиды металлов (OH) являются сильными электролитами. Например, $NaOH$, KOH и $Mg(OH)_2$ являются сильными электролитами. Однако основания, такие как NH_3OH и амины, имеют тенденцию быть слабыми. Самое сильное основание, которое может существовать в воде, это OH . Это потому, что любое более сильное основание будет притягивать протон из воды с образованием гидроксид-иона.

3. *Кислоты.* Некоторые кислоты являются сильными электролитами, другие – слабыми. Большинство кислот находятся где-то между двумя крайностями.

Электролиз является важным аспектом электрохимического процесса. Это взаимосвязь между количеством электричества, прошедшего через элемент, и количеством веществ, образующихся при окислении и восстановлении на электродах (раздел 9.5). Количество электрического заряда, связанного с 1 молем электронов, называется фарадеем (F). Соотношения между Фарадеем и другими обычно используемыми единицами выглядит следующим образом:

$$1 F = 1 \text{ моль электронов} = 96\,500 \text{ Кл/моль} \\ (5,3)$$

5.4.4. Кислотность и значение pH

Все почвы содержат ионы H в своей водной фазе, так как сама вода диссоциирует на ионы H^+ и OH^- . Кислотность почвы меняется в зависимости от сезона. Обычно это выражается как отрицательный логарифм концентрации ионов H^+ , который называется pH. Соответственно, $pH = 7$ обозначает нейтральность, а значение менее 7 обозначает кислотность, которая увеличивается с уменьшением значения pH. Соотношение между pH и H^+ показано на рисунке 5.6. pH воды и других жидкостей можно проверить по стандартной процедуре ASTM (ASTM D1293).

Кислотность почвы и воды важна для инженера-геотехника из-за ее коррозионного воздействия на фундаментные конструкции и строительные материалы; с другой стороны, кислотность иногда желательна из-за ее каталитического воздействия на определенные реакции, используемые при стабилизации почвы для ее улучшения. В настоящее время значение pH используется для указания степени загрязнения в большинстве водных фаз, включая кислотные дожди, дренаж кислых шахт и выщелачивание. Поскольку pH указывает только концентрацию иона H , как показано на рисунке 5.6, другие ионы, присутствующие в растворе, не могут быть обнаружены. Следовательно, достоверность значения pH как единого индикатора для всей загрязненной поровой жидкости сомнительна.

Пример 5.4

Какое значение рН раствора гидроксида натрия (NaOH) составляет 0,01 моль/л?

Решение

$$(\text{OH}^-) = 1 \times 10^{-2} \text{ моль/л}$$

$$(\text{H}^+) = 1 \times 10^{-12} \text{ моль/л}$$

$$\text{pH} = -\log_{10} (\text{H}^+) = -(-12) = 12$$

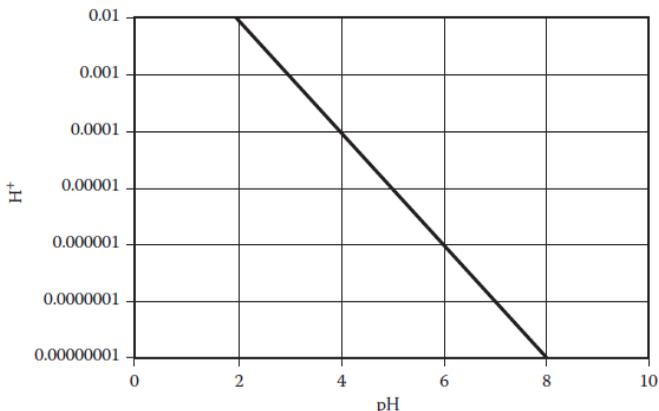


Рисунок 5.6. pH против концентрации ионов H^+ .

5.5. ВИДЫ И ИСТОЧНИКИ ВОДЫ

5.5.1. Грунтовые воды

Использование подземных вод в США составляет приблизительно 20 % от общего потребления воды в стране. На ее долю приходится более 85 % общего водоснабжения в нескольких юго-западных штатах, и она обеспечивает общее или частичное водоснабжение большинства из 100 крупнейших городов страны. По оценкам, более 50 % населения страны и более 95 % сельского населения получают питьевую воду из ресурсов подземных вод. Также имеются признаки того, что некоторые подземные воды использовались для строительных проектов.

Значение загрязнения грунтовых вод невозможно переоценить. Todd и McNulty (1976) дают обзор литературы по загрязненным подземным водам, в которой обсуждаются причины, происшествия, процедуры контроля и методы мониторинга. Около 30 конкретных тем рассматриваются в заголовках глав, посвященных городским, промышленным и сельскохозяйственным загрязнениям, загрязнениям из колодезной, соленой и поверхностной воды и методы оценки загрязнения.

Кроме того, McNabb и соавторы (1977) сообщили о том, как борьба с нутриентами, бактериями и вирусами связана с загрязнением подземных вод и его

механизмами. Проблемы загрязнения подземных вод в США были рассмотрены. В последнее время проблемы, связанные с загрязнением подземных вод, были расширены и теперь охватывают больше веществ, среди которых стоит выделить газ радон ($Rn-222$) (раздел 10.4), нефтепродукты, металлы и другие опасные или токсичные химические вещества (раздел 14.4). Как мониторинг, так и измерения на месте при исследованиях подземных вод и зон аэрации дополнительно обсуждаются в разделе 7.10.

5.5.2. Речные и озерные воды

Вода в реках и озерах имеет различные составы, часто содержащие растворенные минералы из различных геологических формаций, разлагающуюся растительность, мертвых животных и т. д. Некоторые внутренние озера являются солеными, потому что они накопили огромное количество растворенных минеральных солей. Кислотный дождь и кислотный дренаж также влияют на водные компоненты озер и рек. Озера, содержащие в своих водах высокие концентрации солей, называются солеными озерами. Если они богаты натрием (Na) и карбонатом калия (K_2CO_3), их называют щелочными озерами; озера, богатые сульфатом натрия (Na_2SO_4), называются горькими озерами.

5.5.3. Жесткие, мягкие, кислотные и щелочные воды

5.5.3.1. Жесткие и мягкие воды

Жесткая вода – это вода, содержащая ион кальция (Ca^{2+}) и ион магния (Mg^{2+}) в концентрациях, превышающих приблизительно 60 частей на миллион. Жесткая вода может привести к образованию накипи в дренажных трубах, резервуарах для воды, бойлерах и различных типах фундаментных конструкций. Такие чешуйки являются результатом образования твердых карбонатов кальция и магния ($MgCO_3$). Вода может быть смягчена путем удаления ионов кальция и магния. Механизм, объясняющий, как жесткая вода превращается в мягкую воду, обсуждался в разделе 4.8.

Вода, из которой была удалена большая часть ионов кальция и магния, называется мягкой водой. Некоторые воды мягкие от природы, в то время как другие имеют разную степень жесткости. Одним из распространенных методов смягчения воды является использование ионообменных методов (ASTM D1126).

5.5.3.2. Кислотные и щелочные (основные) воды

Любая жидкость может быть кислотной, основной (щелочной) или нейтральной. Кислотные растворы имеют концентрации ионов гидрония (H_3O^+), которые выше, чем у чистой воды, а основные растворы имеют концентрации ионов гидрония, которые меньше, чем у чистой воды (раздел 5.4.3 и рисунок 5.6). Большая часть кислой воды получается из кислотных дождей и кислотных дренажей. Важность этих кислых вод, связанных с экологическими проблемами, была кратко обсуждена в разделе 1.6. Влияние климата на кислотные дожди будет обсуждаться в разделе 8.3. В таблице 5.3 представлен типичный химический состав кислотных дождей.

Таблица 5.3. Типичный химический состав кислотного дождя

Кислота	pK _a	Кислота	pK _a
HCl	0	Al(H ₂ O) ₆ ³⁺	5
HNO ₃	0	Al(H ₂ O) ₆ ³⁺	6,4
H ₂ SO ₄	0	H ₂ S	6,4
H ₂ SO ₃	1,9	HSO ₃ ⁻	7,2
HSO ₄ ⁻	2,0	H ₂ PO ₄ ⁻	7,2
H ₃ PO ₄	2,1	B(OH) ₃	9,0
HF	3,2	H ₄ SiO ₄	9,2
Fe(H ₂ O) ₆ ³⁺	3,0	NH ₄ ⁺	9,3
Fe(H ₂ O) ₅ OH ²⁺	4,0	HCH	9,3
Органические кислоты	3,5	HCO ₃ ⁻	10,3
H ₂ O (вода)	14		

Примечание

K_a = константа кислотной ионизации (большое значение константы ионизации в том, что она указывает на интенсивную реакцию с водой).

pK_a = отрицательные логарифмы K_a (этот показатель также используется для указания силы слабого электролита).

Источник: по Gunnerson, G. G. and Willard, B. E., eds. (1979), Acid Rain, ASCE, New York, 166 p.

Кислотный дренаж обычно называют кислотным дренажом шахты. Этот процесс заключается в стоке воды из старых заброшенных угольных шахт. Сульфиды или пириты железа в шахтах окисляются и образуют серную кислоту. Затем серная кислота растворяется в воде и стекает через шахты. Кислый раствор, содержащий растворенные минералы, называется кислым дренажом шахты. Когда эти кислые воды попадают в ручьи, озера или почву, они вызывают загрязнение почвы и воды. В 1969 году в США произошло загрязнение дренажных шахт, по оценкам, около 16 000 км водных путей, в основном в Пенсильвании, Западной Вирджинии и Кентукки. Также сообщалось об оценке загрязнения кислотных шахт в южной части штата Иллинойс. Кислая шахтная вода представляет собой химически сложную жидкость, не имеющую определенной количественной связи между ее составляющими. Она транспортирует и осаждает в основном неорганические материалы в виде твердых веществ, в растворе или в суспензии. Эти кислые шахтные воды варьируются от щелочных до сильно кислых (Stefanko и соавторы, 1965). Основными загрязняющими веществами в кислой шахтной воде являются серная кислота (H₂SO₄) и гидроксид железа (Fe[OH]₃). Гидроксид железа представляет собой желатиновый осадок ржавого цвета, который покрывает дно ручьев и разрушает водную флору и фауну, и является основной проблемой загрязнения рек в Пенсильвании.

В дополнение к железу и серной кислоте, в кислой шахтной воде присутствуют ионы, но обычно в гораздо меньших количествах. Наиболее важными из этих примесей являются кремнезем, алюминий, марганец, кальций, магний и сульфат. Кислая шахтная вода является подходящей средой обитания для некоторых видов микроорганизмов. Большинство из этих микроорганизмов

являются бактериями, принадлежащими к группе бацилл. Эти бактерии автотрофны; они не требуют органического материала для своего существования и получают энергию путем окисления неорганических веществ. Кислотная дренажная вода вызывает коррозию в различных стальных и бетонных конструкциях, дорожных покрытиях, вывесках, дренажных трубах, водопропускных трубах и подземных сооружениях. Для предотвращения кислотного осушения шахт обычно рекомендуется закрывать заброшенные шахты или отводить воду, которая течет через шахты.

Другие типы загрязненных вод перечислены и обсуждены в главах 7 и 8. Загрязнение морской воды обсуждается в разделе 14.4. Идентификация и измерение качества этих вод могут быть выполнены посредством надлежащего лабораторного анализа, предоставленного разделом 11 Стандарта ASTM (2016).

5.6. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ ПОЧВА-ВОДА

5.6.1. Поверхностные электрохимические характеристики почвы

Взаимодействие между жидкостью и твердым веществом может происходить только на поверхности твердого тела. Поверхности твердых частиц почвы могут влиять на структуру воды не только электрическим взаимодействием с диполями H_2O и их направленной способностью образовывать связи, но также и отсутствием такого взаимодействия. Поверхность твердой частицы почвы может служить тем, на что можно опираться, при этом она защищена крупными и рыхлыми клеточными структурами, которые имеют тенденцию создавать молекулы воды. Основные компоненты системы почва–вода проявляются следующим образом.

1. Поверхности почвы представлены минералами с их характерными геометрическими и электрическими рисунками.

2. Катионы, расположенные внутри минерала или на его поверхностном слое в случае очень сухих почв, диссоциируют в большей или меньшей степени в окружающую водную фазу, пока не будет установлено равновесие между кинетическими дисперсионными силами катионов и их кулоновским притяжением к зарядам на минеральных поверхностях.

3. Молекулы воды встречаются в различных формах из-за различных ассоциаций плотности упорядочивания на поверхностях минералов, вокруг диссоциированных ионов и доменов свободной воды, причем распределение различных форм зависит от количества и активности компонентов и температуры. Таким образом, в водной суспензии глины вода может находиться в условиях, описанных в разделе 4.9 и на рисунке 4.8. Взаимодействие почвы и воды представляет собой сложное явление, которое включает ионообменную реакцию, выщелачивание, осмотическое давление, гидратацию, адсорбцию, теплоту смачивания и реакции окисления–восстановления. Дальнейшие обсуждения экологических аспектов представлены в следующих разделах.

5.6.2. Пути потока, относящиеся к почвенно-водному взаимодействию

Условия равновесия почвы различаются при контакте с жидкой водой и водяным паром. Даже при одном и том же содержании влаги структура и физико-химические свойства системы почва–вода могут значительно различаться в зависимости от пути потока, из которого было получена влага. Эти пути могут отражать поглощение водяного пара сухой почвой, высушивание влажной почвы до желаемого содержания влаги (рисунок 5.7) или выдавливание жидкой воды из влажной почвы под действием внешнего давления.

5.6.2.1. Путь потока – процесс смачивания

На рисунке 5.7 (1) показано, что вход воды в пористую систему обусловлен ее стремлением к внутренней поверхности системы. Тогда возникающие явления регулируются следующими факторами.

1. Движущая сила или стремление внутренней поверхности почвы к воде, величина которого определяется теплотой смачивания и которое является производением количества и активности внутренней поверхности.

2. Общая пористость и распределение по размерам, которые определяют проницаемость поровой жидкости (или воды) и легкость или сложность выхода свободного и адсорбированного газа (или воздуха) в исходную систему почвы.

3. Скорость разрушения связей между твердыми частицами, которая меняет геометрию поровых пространств.

4. Набухаемость глинистых минералов, которая может приводить либо к внутреннему набуханию, которое уменьшает проницаемость, либо может быть достаточно большой, чтобы привести к отслаиванию поверхности систем.

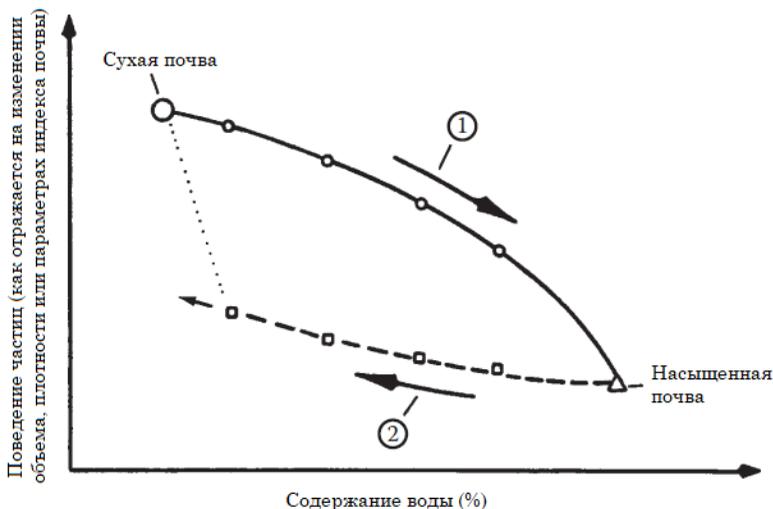


Рисунок 5.7. Влияние процессов смачивания или высушивания на поведение почвы: (1) процесс смачивания (энергетическое поле, образованное многими средами); (2) процесс высушивания (поле тепловой энергии).

5.6.2.2. Путь потока – процесс высушивания

Из рисунка 5.7 (2) понятно, что, когда влажная или связная почвенная система теряет воду, частицы почвы движутся все ближе и ближе друг к другу. Если сушка происходит от поверхности вниз, как в грязевой плоскости, обезвоженный поверхностный слой сжимается, в то время как водостойкость между верхним и нижним слоями и самими слоями препятствует регулированию уменьшения объема поверхностного слоя. В результате в поверхностном слое возникают растягивающие напряжения. Этот способ растрескивания обеспечивает наибольшее снятие напряжения при минимальном объеме работы.

Направление потока являются важным фактором, и отмечается, что одинаковое содержание воды в почве не является необходимым для придания одинаковых инженерных свойств. На рисунке 5.8 (а и b) показано значительное влияние направления потока на уплотнение и предельное содержание жидкости.

5.6.3. Взаимодействие почвы и воды в различных областях энергетики

Взаимодействие почвы и воды является довольно сложным процессом. Если речь идет о загрязненной воде, то ситуация усложняется еще больше. Для оценки системы почва–вода мы должны рассматривать элемент почвы в три этапа: твердое вещество, жидкость и газ. Жидкая часть может быть разделена на две части: гравитационная вода и вода окружающей среды. Гравитационная вода находится на большом расстоянии от растворенных ионов и молекул и существующих границ раздела почва–жидкость и жидкость–газ. На воду в окружающей среде сильное влияние оказывают местные условия окружающей среды, такие как характер поровой жидкости, температура и давление. В следующем разделе добавлены комментарии относительно взаимодействия почвы и воды в областях тепловой и электрической энергии.

5.7. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОЧВЫ И ВОДЫ В ТЕРМИЧЕСКОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

5.7.1. Теплота смачивания

Теплота смачивания является важной реакцией в системе почва–вода. Когда вода контактирует с сухой или частично насыщенной почвой, выделяется тепло. Теплота смачивания – это выделение тепла от гигроскопичных веществ, когда они становятся влажными. Это явление происходит в мелкозернистой почве, особенно в коллоидах, так что количество тепла, выделяющегося при смачивании почвы, возрастает с увеличением степени измельчения. Коллоидные почвенные материалы дают сравнительно высокие теплоты смачивания, хотя варьируются в зависимости от типа материала и поровой жидкости. Теплота смачивания может быть измерена с помощью простого прибора, разработанного Winterkorn and Baver (1934), который широко используется в лабораториях (Vees and Winterkorn, 1967). Факторы, влияющие на теплоту смачивания, представлены далее.



(а)

Данные почвы

Верхний предел пластичности = 72

Индекс пластичности = 37

Единая классификация: СН



(b)

Рисунок 5.8. Влияние направления движения потока на инженерные свойства почв: (а) результат испытания на уплотнение; (б) результат исследования верхнего предела пластичности (Данные из: Tamez, E. [1957], Some factors affecting the dynamic compaction test, ASTM STP 232, pp. 54–66; Krebs, R. D. [1964], Discussion of study of reproducibility of Atterberg limits, HRR № 63, pp. 29–30).

Влияние размера частиц на теплоту смачивания показано на рисунке 5.9. Также рассматривается сравнение между загрязненными и незагрязненными образцами почвы. Как пишут Winterkorn и Fang (1991), смачивание 1 г бентонитовой глины, высушенной над фосфорной кислотой (P_2O_5) с 0,3 г воды, приводит к выделению примерно 20 кал или около 1200 кал на моль воды, таким образом происходит взаимодействие; это примерно четверть энергии водородной связи на моль воды.

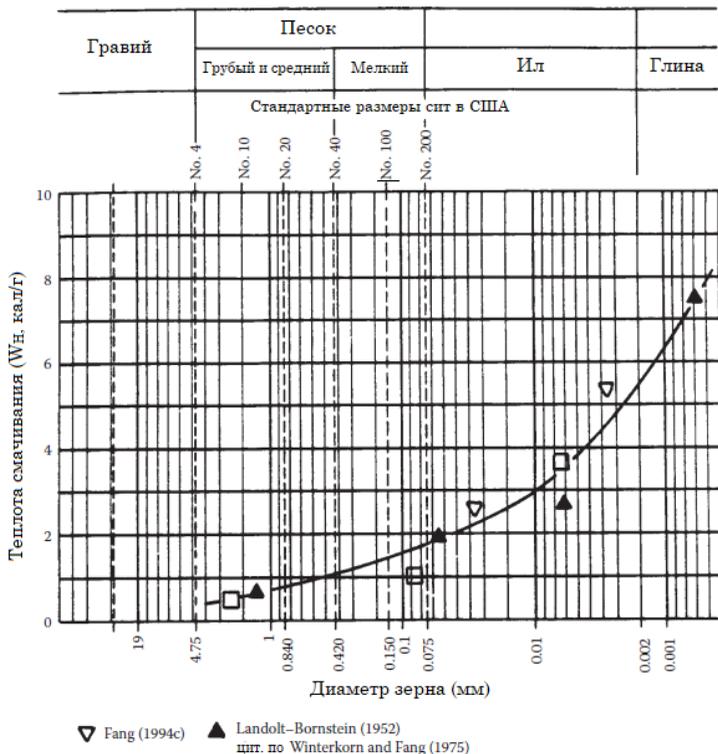


Рисунок 5.9. Влияние размера частиц почвы на теплоту смачивания.

Влияние обменных ионов на теплоту смачивания также важно. Важны факты, когда тепло выделяется или поглощается в виде ионов, или смачиваются твердые частицы. На рисунке 5.10 представлено сравнение теплоты смачивания и активности естественных и гомоионных почв. После исследования двух типов почв, обнаружены значительные различия между естественными и гомоионными почвами.

Поскольку многие подземные сооружения, такие как суспензионные стены и глиняные прокладки, изготавливаются в основном из бентонита, поверхностное поведение бентонита чувствительно к типу поровой жидкости, а температурный градиент является одним из основных факторов в опасных и контролируемых объектах; следовательно, должны быть установлены характеристики теплоты смачивания для разных типов почвы и поровой жидкости. На рисунке 5.11 представлена взаимосвязь между типами почвы, отраженная соотношением кремнезема и полуторной окиси и теплотой смачивания. Существенных различий между цесильской почвой и Са-бентонитом не обнаружено. Природные характеристики этих естественных почвенных отложений, приведенных на рисунке 5.11, можно найти в разделе 3.6 и в таблице 3.11.

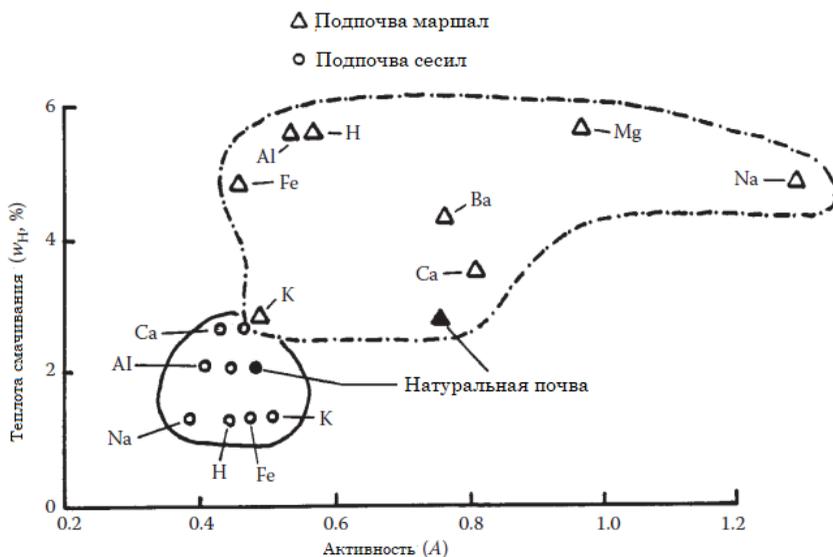


Рисунок 5.10. Сравнение теплоты смачивания и активности естественных и гомоионных почв (данные из: Winterkorn [1942], Soil Sci., v. 54, pp. 259–273 and Table 4.8).

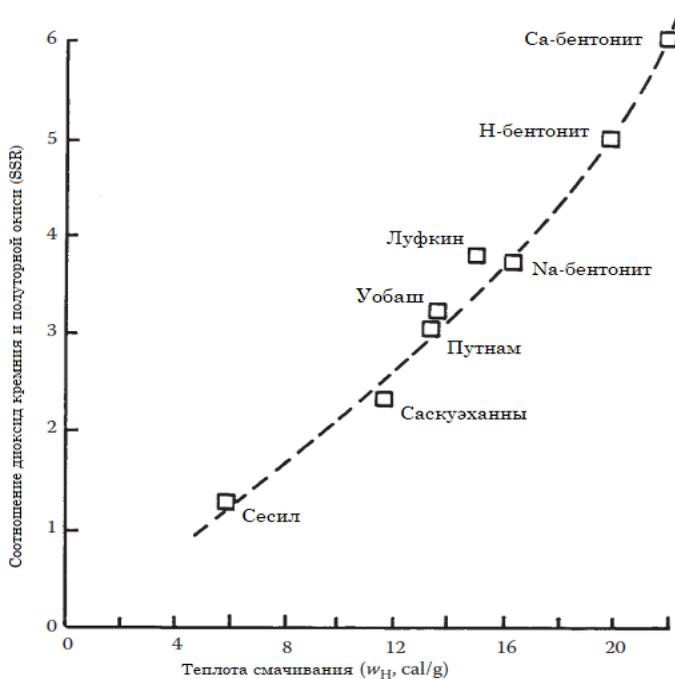


Рисунок 5.11. Соотношение между соотношением диоксида кремния и полуторной окиси и теплотой смачивания для нескольких естественных отложений почвы.

5.7.2. Способность водозабора

Почва поглощает воду, и способность каждого типа почвы к водозабору важна для инженера. Механизм водопотребления будет обсуждаться в данном разделе. Дальнейшее обсуждение насыщения и сорбции (абсорбции + адсорбции) почвы будет представлено в разделе 6.5.

На рисунке 5.12 продемонстрировано потребление воды, а на рисунке 5.13 показано изменение объема воды, удерживаемой на кубический сантиметр почвы, в зависимости от уплотняющих нагрузок и ионов. В натриевой (Na) почве наблюдается значительное уменьшение объема воды при нагрузке. Объем воды в естественной почве значительно уменьшается при первом увеличении нагрузки, но, даже когда нагрузки становятся больше, изменение объема относительно невелико. В почве с кальцием (Ca) отмечается наименьшее количество общего изменения объема среди всех гомоионных почв как при уплотнении, так и при расширении. Это явление указывает на то, что водные пленки вокруг частиц кальциевой почвы компактны и подвержены лишь умеренному уменьшению при увеличении нагрузки. Небольшое увеличение содержания влаги во время снижения давления указывает на то, что кальций имеет небольшую привлекательность для дополнительной воды.

В случае калия (K) водная пленка также является компактной и слегка уменьшается под давлением; однако, когда нагрузка полностью снимается, происходит значительное увеличение объема, что связано либо с сильным притяжением иона калия к воде, либо с повышенной упругостью почвенной системы. Натриевая почва, если она не ограничена, привлечет большое количество воды. Однако это притяжение недостаточно сильное, чтобы произвести заметное увеличение объема при прекращении нагрузок консолидации. Как указывалось выше, влияние ионов на технические свойства почв может быть связано не только с изменением стремления воды к ионам, но также с изменением упругих свойств и агрегации твердого грунта.

5.7.3. Кинетическая дисперсионная сила

В поле тепловой энергии важны кинетические дисперсионные силы вокруг частицы почвы. Эти силы можно оценить по классическим термодинамическим необратимым процессам. основополагающими принципами термодинамики являются закон сохранения энергии и второй закон термодинамики, который заключается в том, что одна система либо остается постоянной (обратимый процесс), либо увеличивается (необратимый процесс). Эта функция называется энтропией системы. Теорема также позволяет вычислять абсолютные энтропии, если известны конкретные значения теплоты компонентов системы для всего диапазона от абсолютного нуля до рабочей температуры. Следовательно, дисперсионные и возмущающие силы тепловой энергии, E_T , могут быть вычислены по формуле:

$$E_T = \int_{T_0}^T C_v dt \quad (5.4)$$

где E_T – общее содержание тепловой энергии на моль, C_V – моль тепла при постоянном объеме, T – температура, представляющая интерес, T_0 – абсолютная нулевая температура и dt – перепад температур.

В уравнении 5.4, где коэффициент емкости представляет собой моль-теплоту (C_V),

$$C_V = (\text{удельная теплоемкость}) \times (\text{мольная масса}) \quad (5.5)$$

Коэффициент интенсивности представляет собой абсолютную температуру, предпочтительно измеренную в °К. Общее содержание тепловой энергии (E_T) на моль может быть рассчитано из уравнения 5.4. Моль теплоты (C_V) является функцией температуры и состояния вещества (газ, жидкость или твердое вещество), поскольку последнее определяет различные способы использования тепловой энергии.

В твердом состоянии мы можем иметь колебания атомов в трех измерениях декартова пространства вокруг их положений равновесия. В жидкостях у нас могут быть подобные колебания вокруг временных положений равновесия, а также вращение и перемещение. В одноатомных газах мы имеем сдвиги, к которым добавляются вращения и колебания в случае двух-, трех- и многоатомных молекул и, наконец, электронные колебания при повышенных температурах. Для подробного изложения различных явлений и их теоретической обработки даны ссылки на стандартные работы по теории удельных теплоемкостей. Разупорядочение и дисперсионные силы возрастают с ростом температуры, и эти силы не одинаковы для каждой молекулы в конкретной системе, поддерживаемой при определенной температуре, они распределяются вокруг среднего значения в соответствии с функцией вероятности Больцмана.



Рисунок 5.12. Водопоглощающая способность в зависимости от активности (сравнение естественной и гомоионной почв) (данные из таблицы 4.8).

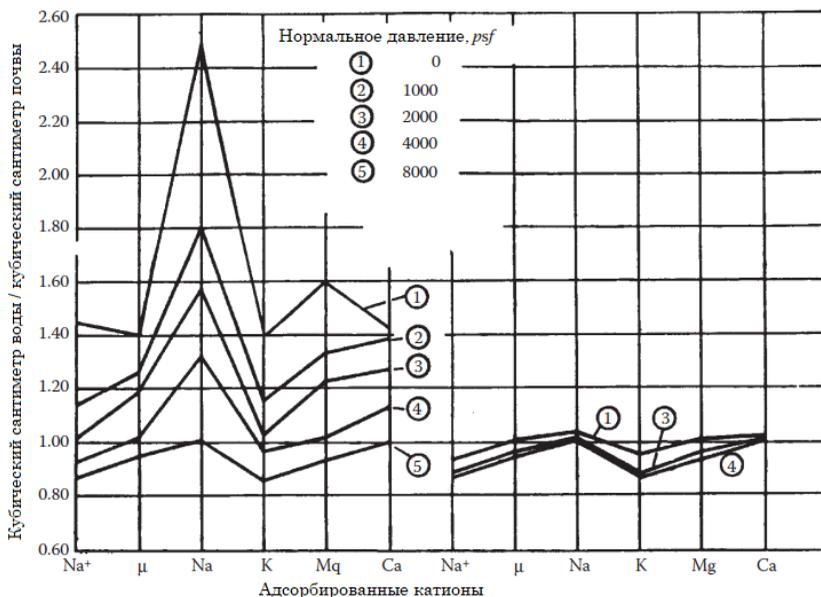


Рисунок 5.13. Влагоудерживающая способность глины путнам как функция обменных ионов и нормального давления (по Winterkorn, H. F. and Moorman, R. B. B. [1941], Proc. 21st Annual Meeting, HRB, pp. 415–434. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не подлежит защите авторских прав).

5.8. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОЧВЫ-ВОДЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

5.8.1. Поляризация

Все атомы и, следовательно, образующиеся из них молекулы содержат положительные и отрицательные электрические заряды, причем положительный заряд связан с атомным ядром, а отрицательный исходит от электронов, окружающих ядро. Размер ядер составляет порядка 10^{-12} Å, а размеры атомов порядка 10^{-8} Å; электроны занимают большую часть атомных и молекулярных объемов.

В сильных электрических полях объем, занимаемый электронами, может быть искажен и смещен относительно положения связанных ядер. Это явление называется поляризацией. В то время как положительные и отрицательные заряды, связанные с веществом, пытаются расположиться в пространственном порядке, который приводит к взаимной нейтрализации, их объем и структурные свойства мешают этой тенденции. Для более глубокого понимания см. стандартный учебник по физической химии.

5.8.2. Протонная миграция

В сильно электрической или полярной системе, состоящей из минералов почвы, растворенных ионов и диполей воды, различные электрические поля, связанные с этими компонентами, имеют тенденцию перестраиваться в направлении самой низкой свободной энергии или самой высокой энтропии системы. Первостепенную роль в этой переналадке играет миграция протонов и их обмен. По мнению Еугаус и соавторов (1965), это объясняет:

- 1) медленная гидратация оксидов путем термической диффузии протонов;
- 2) проявление кислотности Льюиса путем обмена поверхностной молекулы воды с любой другой молекулой из газовой или жидкой фазы;
- 3) проявление кислотности Бренстеда путем обмена поверхностного протона с определенным раствором.

Эта модель также объясняет значительную роль, которую играет внутренняя гидратация в формировании тропических почв или латеритных почв (раздел 13.9). За это отвечает увеличение кинетической активности протона с ростом температуры, что выражается также в увеличении степени диссоциации молекулы воды с повышением температуры.

5.9. ГЕОМОРФНЫЙ ПРОЦЕСС (ПРОЦЕСС СТАРЕНИЯ)

5.9.1. Концепция геоморфологического процесса

Исходный материал в данном случае из-за различных факторов окружающей среды после определенного периода времени постепенно изменит свою форму или свойства. Стадии или явления таких изменений называются геоморфологическими процессами, которые описал Fang (1986); они проиллюстрированы на рисунке 5.14. Скорость изменения зависит от того, насколько серьезны условия окружающей среды. Существует пять возможных процессов, которые могут произойти с почвой и породой: (1) механический (нагрузка), (2) химический, (3) физико-химический, (4) геомикробиологический (флора и фауна) и (5) почвообразование.

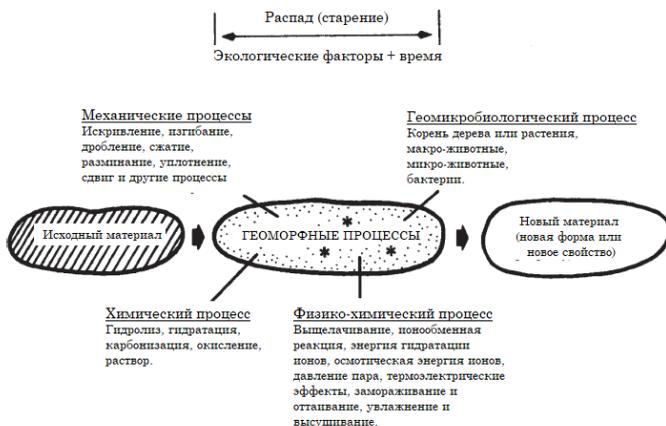


Рисунок 5.14. Этапы геоморфологического процесса (по Fang, H. Y. [1986], Proc. 1st Int. Symp. on Environmental Geotechnology, v. 1, pp. 167–194. С разрешения Enviro Publishing, Bethlehem, PA).

5.9.2. Механизмы геоморфологических процессов

5.9.2.1. Механические причины и кратковременный процесс

Как показано на рисунке 5.14, механические процессы включают уплотнение, сжатие, сдвиг и т. д. Результаты механических процессов изменяют физические свойства почвы, что отражается на зависимости нагрузки от прогиба, напряжения от деформации или пористости от соотношения давления. В общем, механическое изменение считается краткосрочным процессом, в то время как другие являются долгосрочными процессами.

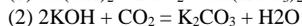
5.9.2.2. Химические и физико-химические процессы

Химическое выветривание может вызывать изменения, как показано на рисунке 5.14, включая гидролиз, гидратацию, карбонизацию, окисление, растворение и т. д. Некоторые из этих процессов показаны в таблице 5.4. Конечно, все процессы функционируют в соответствии с местной средой. Например, во влажном климате, где влажность присутствует в почве в течение длительных периодов времени, химические и физические процессы вызывают разрушение горных пород. Сочетание минеральных компонентов, особенно железа с кислородом, приводит к превращению солей двухвалентного железа в соединения трехвалентного железа, как показано в уравнении 14 таблицы 5.4. Минералы, содержащие сильные основные элементы, склонны обменивать часть основания с водородом в воде, как показывают уравнения 6 и 7 в таблице 5.4. При разложении органического вещества в системе почва–вода производится большое количество CO_2 . Этот газ легко объединяется с основаниями, образующими карбонаты или бикарбонаты; типичные случаи показаны в уравнениях 1 и 2 в таблице 5.4.

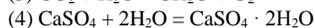
Поскольку бикарбонаты кальция и магния являются достаточно растворимыми, карбонизация является основным процессом накопления остаточного материала почвы в результате разложения известняка и разложения минералов с высоким содержанием кальция. Карстовая воронка (раздел 13.6) является типичным случаем разложения известняка. Уравнение 8 в таблице 5.4 обычно ассоциируется с геологической инженерией. При совместном действии карбонизации и гидролиза ортоклаз ($2\text{KAlSi}_3\text{O}_8$) с CO_2 и $2\text{H}_2\text{O}$ превратится в каолинит ($\text{H}_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), карбонат калия (K_2CO_3) и аморфный диоксид кремния (4SiO_2). По прошествии времени и с изменением местных условий окружающей среды свойства и формы почв будут продолжать меняться. Ортоклаз может превращаться в каолинит и калий. Аналогично, каолинит и другие превратятся во что-то иное, если местные условия окружающей среды изменятся. Скорость изменения зависит от того, насколько суровы условия окружающей среды.

Таблица 5.4. Геоморфные процессы за счет химических и физико-химических процессов

Углекислота

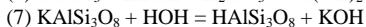
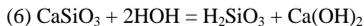


Гидратация

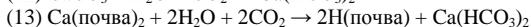
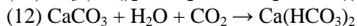
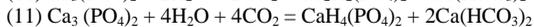
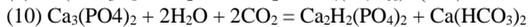
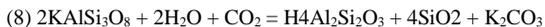




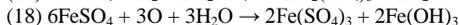
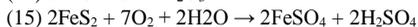
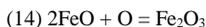
Гидролиз



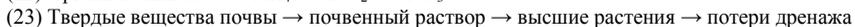
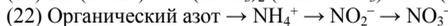
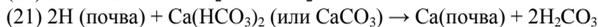
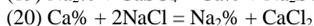
Карбонизация и гидролиз (раствор)



Окислирование



Ионный обмен и др.



5.9.2.3. Геомикробиологический процесс

Термин «геомикробиологический процесс» предложил Fang (1986); см. таблицу 5.5. Геомикробиологический процесс делится на две основные категории: флора и фауна. Флора – это в основном корни деревьев или других растений, которые оказывают определенное влияние на структуру и поведение почвы, но не так значительно по сравнению с бактериальным воздействием (таблица 5.6) на почву, которое может быть прямо или косвенно связано с химическим или физико-химическим изменением поведения почвы. Например, разложение на свалке вызывает повышение температуры грунта. Из-за аэробных условий, обычно преобладающих на свалках или в загрязненной почве над уровнем грунтовых вод, эти бактерии окисляют сульфид до серной кислоты, которая поражает подземные структуры. Кроме того, бактерии автотрофного типа требуют энергии для их выживания и получают ее от окисления минеральных компонентов. В результате это может изменить глинистые минеральные структуры и изменить поведение почвы во время геоморфологических процессов, как показано в таблице 5.6.

Таблица 5.5. Инженерная классификация геомикробиологии и ее влияние на геотехнические проблемы

Типы и описания	Горизонты	А	В	С	Влияние на геотехнологию
<i>Флора</i>					
Корни деревьев или растений Древовидная система Почвенно-корневая система Корневая механика		х	х		Наземный поселок; сломанные дренажные трубы; повреждено дорожное покрытие; поврежденные вкладыши мусорной свалки
<i>Фауна</i>					
<i>Животные</i>					
Макро-животные Грызуны, многоножки, пауки, клещи, слизни, улитки, дождевые черви, муравьи и прочие насекомые		х	х		Повреждения верхних уплотнений глиняных вкладышей; верхняя часть пульпы стены; поверхностная эрозия
Микро-животные Протозоа Амебы, жгутики, инфузории		х	х		Бактериальная коррозия; вкладыши мусорных свалок
Нематоды Питаются разлагающимися органическими веществами; питаются дождевыми червями, простейшими и бактериями		х	х		Бактериальная коррозия
<i>Бактерии</i>					
Гетеротрофные Энергия и углерод непосредственно из органического вещества почвы		х	х	х	Бактериальная коррозия; глиняные вкладыши; жидкие стены
Аутотропные Энергия от окисления минеральных компонентов			х	х	Бактериальная коррозия

Таблица 5.6. Влияние бактерий на поровые жидкости

- (a) $\text{H}_2\text{S} + 2\text{O}_2 \xrightarrow{\text{бактерии}} \text{H}_2\text{SO}_4$
- (b) $\text{CH} + \text{O}_2 \xrightarrow{\text{бактерии}} \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- (c) $\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 \xrightarrow{\text{бактерии}} \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- (d) $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \xrightarrow{\text{бактерии}} 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
- (e) $\text{SO}_4^{2-} + \begin{matrix} \text{Органическая} \\ \text{материя} \end{matrix} \xrightarrow[\text{бактерии}]{\text{анаэробные}} \text{S}^{2-} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$
- (f) $\begin{matrix} \text{Органические соединения} \\ \text{серы} \end{matrix} + \text{O}_2 \xrightarrow{\text{бактерии}} \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_4^{2-}$
- (g) $\begin{matrix} \text{Органические соединения} \\ \text{азота} \end{matrix} + \text{O}_2 \xrightarrow{\text{бактерии}} \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{NO}_3^-$
- (h) $\text{Органические соединения азота} + \text{O}_2 \xrightarrow{\text{бактерии}} \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{PO}_4^{3-}$
- (i) $\text{Органические соединения серы / азота} + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow[\text{распад}]{\text{анаэробный}} \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S} + \text{CH}_4 + \text{NH}_4^+$

5.9.2.4. Процесс почвообразования

Почвообразующие процессы в основном представляют собой сочетание физико-химических, химических и геомикробиологических процессов. Термин «почвообразование» широко используется в почвоведении и сельскохозяйственном машиностроении. Факторы, связанные с развитием почв из накопленных материалов, образующихся в результате выветривания горных пород, можно сгруппировать в четыре категории: климатические, биотические, эдафические и топографические, как обсуждалось в главе 3. Климатические факторы включают температуру и количество осадков, а биотические факторы включают флору и фауну (таблица 5.5). Эдафические факторы относятся к исходным почвенным материалам, а топографические факторы в основном касаются рельефа поверхности. Почвообразующие процессы можно сгруппировать в следующие подгруппы.

1. *Подзолизация*. Подзолизация – это главным образом процесс растворения, который охватывает как истинные растворы, так и почву, и, следовательно, является разрушительным процессом, который происходит в кислых средах во всех влажных регионах. Это начинается, когда достаточное количество основных элементов выщелочено для воздействия на кислотность.

2. *Латеритизация*. Латеритизация характеризуется удалением кремнезема и остатков полуторной окиси до такой степени, что отношение глинозем–кремнезем (раздел 3.6) становится от 1,0 до менее 2,0 или падает ниже сиаллитовой стадии. Иногда это называется десилификацией.

3. *Карбонизация*. Карбонизация – это почвообразующий процесс субвлажных, полусухих и засушливых районов. Это превращение почвенного кальция в основном в карбонаты, которые накапливаются в недрах на разных глубинах, что определяется количеством годовых осадков.

4. *Подщелачивание*. Подщелачивание является доминирующим процессом почвообразования в засушливых регионах. Оно заключается главным образом в накоплении растворимых солей, которые образуются в результате выветривания

минеральных частиц почвы вследствие недостаточного количества осадков или дренажа, чтобы унести их, а также из-за действия солей, особенно солей натрия. В этих типах почв ионообменные соединения содержат значительное количество натрия и калия; в некоторых из этих соединений процент этих двух щелочных катионов (обменных) может достигать 100 % (Kelley и Brown, 1924, цит. по: Kelley, 1948). Деградация натриевых щелочных почв (солончаков) может иметь место, когда такие почвы вследствие понижения уровня грунтовых вод подвергаются выщелачиванию, в результате которого обменные щелочные катионы (Na, K) могут в конечном итоге в большей или меньшей степени быть вытеснены водородом.

5.10. КОРРОЗИОННЫЙ ПРОЦЕСС

5.10.1. Общее обсуждение

Процесс коррозии является частью геоморфологического процесса или «процесса старения». Он связан со временем и местными условиями, как описано в разделе 5.9 и показано на рисунке 5.14. Коррозия открытых элементов конструкций, особенно мостов, автомобильных дорог и морских сооружений, подрывает целостность этих конструкций и создает экономические проблемы. Нельзя отрицать важность поиска экономически эффективных решений проблемы коррозии. Существует три среды, в которых происходит коррозия: воздух, вода и грунт. На протяжении многих лет исследования подземной коррозии, в которых участвует почвенная среда, относительно игнорировались, в отличие от исследований коррозии в воздухе и воде. Это связано прежде всего с тем, что коррозия под землей видна плохо.

5.10.2. Причины, типы и защита от коррозии

5.10.2.1. Общее обсуждение

Различные химические соединения и микроорганизмы в почвенной матрице вызывают и ускоряют процесс коррозии и разрушения стальных и бетонных конструкций под землей. Природные или антропогенные явления, такие как кислотные дожди, сброс опасных отходов и выщелачивание на свалках, загрязняют почву и грунтовые воды во многих районах. Такие загрязнения обеспечивают агрессивную среду, в которой коррозия может стать критической. Кроме того, продолжающаяся метаболическая активность некоторых микробных сообществ приводит к образованию агрессивных химических веществ. Следовательно, сталь может быть разрушена катодно или физически (точечная коррозия). Бетон, который защищает арматурную сталь, может подвергаться химическому воздействию или проникновению микроорганизмов, которые быстро создают активную химическую среду.

5.10.2.2. Причины коррозии

По сути, коррозия имеет электрохимический характер, и присутствие кислорода в той или иной форме для нее необходимо. Для работы коррозионной ячейки должны быть соблюдены определенные условия: (1) должен быть анод и катод, (2) должен быть электрический потенциал между анодом и катодом, (3) должен быть металлический путь, электрически соединяющий анод и катод. Анод и катод должны быть в проводящем электролите, что означает наличие ионов. Например, стальная поверхность, которая может быть классифицирована как неоднородная, в идеале может обеспечить аноды и катоды. Морская вода или загрязненная почва-водная система – идеальный раствор электролита. В таком случае все условия для коррозии будут присутствовать.

Разница в потенциале между анодом и катодом приводит к миграции электронов от анода к катоду вдоль металлического соединения. На аноде с потерей электрона положительные ионы двухвалентного железа соединяются с отрицательными ионами ОН в воде, образуя гидроксид двухвалентного железа, который также может реагировать дальше, образуя знакомую ржавчину, которую мы хорошо знаем. Количество металла, удаленного из анода, прямо пропорционально количеству протекающего тока. Один ампер тока, протекающего в течение 1 года, может удалить 20 фунтов стали.

5.10.2.3. Бактериальная коррозия

Бактерии и химическая коррозия тесно связаны, поскольку бактерии могут вызывать изменения в характеристиках почвенно-водных систем. Типичным примером этого может быть превращение H_2S в H_2SO_4 в результате действия бактерий, как показано ниже:



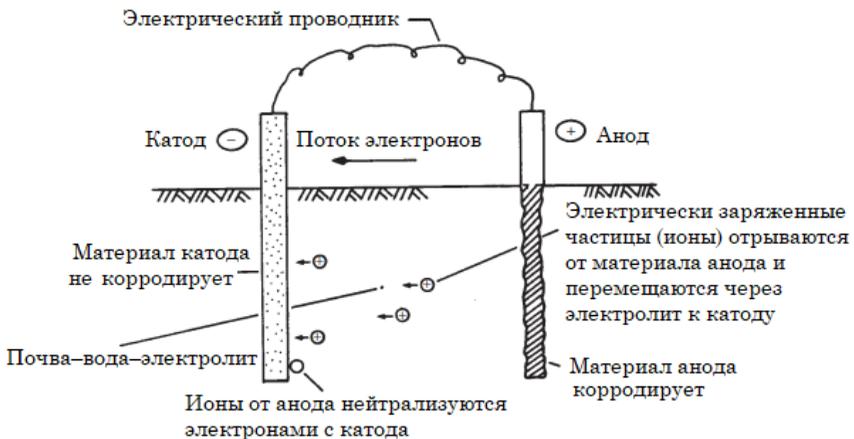
Механизм бактериальной коррозии в прошлом обсуждался многими исследователями. Основные моменты можно сформулировать так: (1) продуцирование коррозионных метаболитических соединений бактериями, например сероводорода; (2) образование прерывистых отложений на поверхности конструкции приводит к дифференциальной аэрации и концентрации клеток; (3) разрушение природных и других защитных пленок; (4) разрушение ингибиторов коррозии и покрытий; (5) деполяризация катодных и анодных реакций (Walch и Mitchell, 1984).

5.10.2.4. Защита от коррозии, пример защиты

На рисунке 5.15a показано влияние анодных и катодных зон на неоднородную поверхность куска стали. Ток покидает анод и течет к катоду. Вероятно, если внешний источник тока будет воздействовать на стальную поверхность больше, чем ток коррозии, тогда вся стальная поверхность станет катодом, и коррозия для всех целей будет аннулирована. По сути, это упрощенная теория катодной защиты. На рисунке 5.15b показан один из методов использования внешнего анода и защитного потока тока к катоду. Подробный разбор других методов защиты, производительности и стоимости сделал Frye (1970).



(a) Процесс коррозии железных или стальных элементов конструкции



(b)

Рисунок 5.15. Процесс и механизм коррозии стали: (a) процесс коррозии и (b) ее пример (по Frye, S. C. [1970], Proc. Design and Installation of Pile Foundations and Cellular Structures, Enviro Publishing, Bethlehem, PA, pp. 191–208. С разрешения Enviro Publishing, Bethlehem, PA).

В гражданском строительстве большинство сооружений, возводимых на поверхности земли, имеют обширные подземные компоненты. Эти компоненты с течением времени могут быть подвержены подземной коррозии. Подземная коррозия является более сложным явлением, чем атмосферная коррозия, из-за большого количества переменных и неизвестных факторов. В прошлом большинство исследовательских работ было сосредоточено на атмосферной коррозии, а не на подземной. Ясно, что необходимо уделять больше внимания этому вопросу для определения причинно-технологических и эксплуатационных факторов для подземных сооружений или компонентов сооружений в экологически неблагоприятных условиях. Эти факторы приведены в блок-схеме на рисунке 5.16.

Коррозия является скрытым врагом для всех подземных конструктивных элементов, таких как анкеры, компоненты фундамента, соединения шпунтовых свай, стальные балки в жестких дорожных покрытиях и мостовых настилах, заклепки и болтовые соединения, а также элементы усиленного заземления. Небольшие отверстия и щели – это место, где бактерии, вызывающие коррозию, могут существовать в большом изобилии. Для лучшего понимания бактериальной коррозии нужно изучать междисциплинарные вопросы, такие как физико-химические и биологические процессы, которые происходят в почве. Необходимо провести дополнительные исследования в этих областях, чтобы лучше оценить условия и процессы, способствующие бактериальной коррозии в почве, и разработать систематические, долгосрочные решения для ее предотвращения.

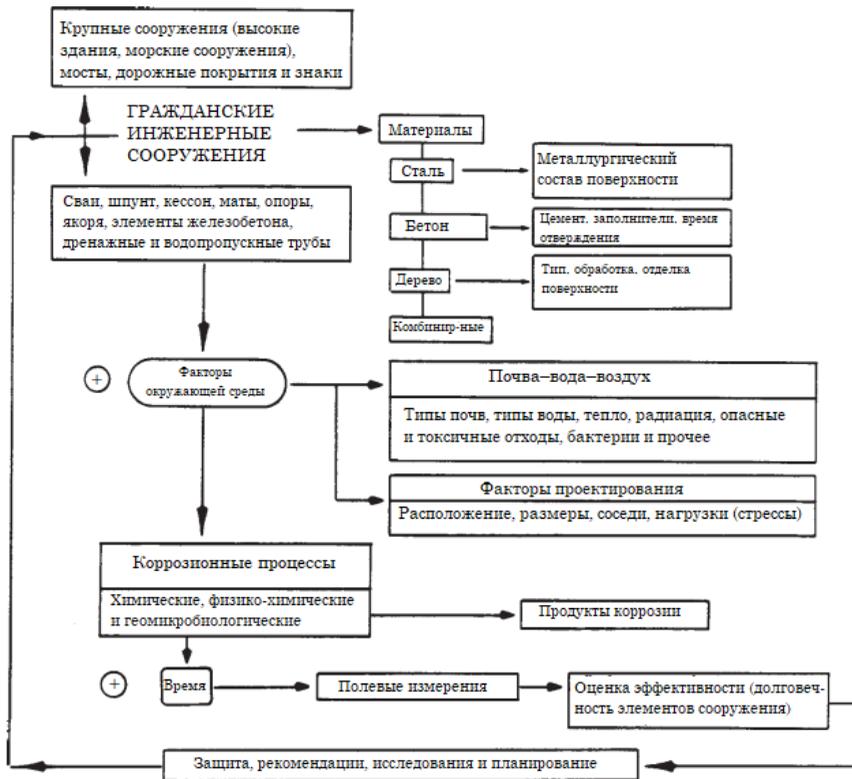


Рисунок 5.16. Коррозия: причины, процесс, характеристика (по Fang, H. Y. [1987], 1st Int. Symp. on Environmental Geotechnolgy, v. 2, D.1 and D.3, Envo Publ. Co., Bethlehem, PA., pp. 290, 297, 310, 340. С разрешения Envo Publishing, Bethlehem, PA).

5.11. ВЛИЯНИЕ БАКТЕРИЙ НА ПОВЕДЕНИЕ СИСТЕМЫ ПОЧВА–ВОДА

5.11.1. Характеристики бактерий

Для изучения долгосрочных характеристик поведения почвы и воды в окружающей среде необходимо оценить влияние бактерий на это поведение. В этом разделе обсуждение сосредоточено на (1) фактах о том, как бактерии существуют в почвенно-водной системе и как они связаны с инженерно-геологической инженерией; (2) механизме взаимодействия почва–вода–бактерии.

Бактерии представляют собой одноклеточные формы. Четыре основных элемента – углерод, водород, кислород и азот – составляют около 98,5 % их клеток.

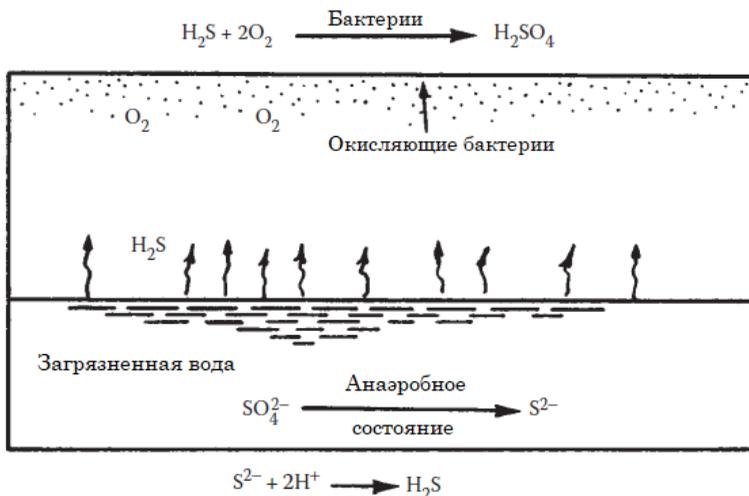


Рисунок 5.17. Образование сероводорода на свалке в результате окисления сероводорода до серной кислоты.

Фосфор и сера вместе составляют дополнительный процент. Наиболее распространенной молекулой во всех живых клетках является молекула воды, которая обычно составляет около 70 % всех веществ в клетке. В целом, существует два основных типа бактерий: гетеротрофные и автотрофные. Гетеротрофный тип бактерий требует энергии и углерода непосредственно из органического вещества почвы, тогда как автотрофный тип требует энергии от окисления минеральных компонентов (Nester и соавторы, 1978).

5.11.2. Взаимодействие почвы–воды–бактерий

Большинство бактерий существует на небольшой глубине от поверхности земли, особенно в горизонте А. Интересный факт: в 1 г почвы может существовать четыре миллиона бактерий (рисунок 3.2b). На поврежденной почве больше бактерий, чем на ненарушенной, потому что воздух (кислород)

способствует появлению большего количества бактерий. Большинство бактерий существует в аэробных условиях, которые находятся выше уровня грунтовых вод. Скорость и степень активности бактерий зависят от наличия питательных веществ, типов микроорганизмов, состава субстрата и температуры. В холодную погоду активность бактерий меньше, но затопление, колебания уровня грунтовых вод или нарушение грунта, например из-за строительства, ускорят аэробный процесс. В анаэробных условиях бактерии существуют в основном ниже уровня грунтовых вод; по сравнению с аэробными условиями, бактериальный процесс в анаэробных условиях более медленный.

Есть три основных возможных способа, которыми бактерии могут заставить почву изменить поведение. Бактерии могут переноситься при ионном обмене, который изменяет структуру почвы и воды, изменяет характеристики поровой воды, как показано в таблице 5.6, или изменяет почву в результате разложения (геоморфологический процесс) ее компонентов. Бактерии и химическая коррозия тесно связаны между собой. Бактерии могут вызывать изменения характеристик почвенно-водных систем. Типичный пример этого эффекта представлен на рисунке 5.17.

5.12. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПОЧВЫ К ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

5.12.1. Общее обсуждение

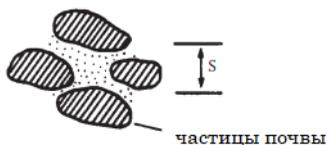
Чувствительность почвы к окружающей среде зависит не только от местной окружающей среды, но также зависит от естественно наследуемой минеральной структуры (размер частиц, характеристики связи между частицами, ионообменная емкость и т. д.). Чем меньше частицы почвы, тем больше шансов, что частица почвы будет взаимодействовать с окружающей средой. Чем слабее энергия связи между частицами или выше ионообменная емкость, тем выше чувствительность частиц к окружающей среде. Например, монтмориллонит потенциально более чувствителен к окружающей среде, чем иллит и каолинит, поскольку группа монтмориллонита имеет большую площадь поверхности, более слабую энергию связи и более высокую ионообменную емкость. В следующем разделе представлены пять тематических исследований с различными условиями окружающей среды, охватывающими чувствительность почвы к нагрузке, температуре, поровой жидкости и типам минералов, а также между *in situ* и лабораторными экспериментами.

5.12.2. Чувствительность почвы к нагрузке

Чувствительность почвы к нагрузке обсуждалась многими исследователями с тех пор, как Terzaghi представил эту концепцию в 1942 году. Однако типы нагрузок в зависимости от степени чувствительности почвы не были четко изучены. На рисунке 5.18 показано влияние площади контакта нагрузки между частицами на чувствительность почвы к окружающей среде. Чем больше площадь контакта или площадь поверхности частиц на единицу объема, тем больше вероятность того, что почва вступит в реакцию с окружающей средой. Следовательно, тип исследования будет зависеть от взаимодействия почвы и окружающей среды. Чтобы проверить, какой тип нагрузочного испытания

является более или менее чувствительным к окружающей среде, изучаются три типа нагрузочных испытаний: испытание на неограниченное сжатие, испытание на прямой сдвиг без нагрузки и испытание на растяжение. Результаты этих исследований рассматриваются и представлены далее (Fang, 1991b).

Состояние перед загрузкой



Условия при загрузке

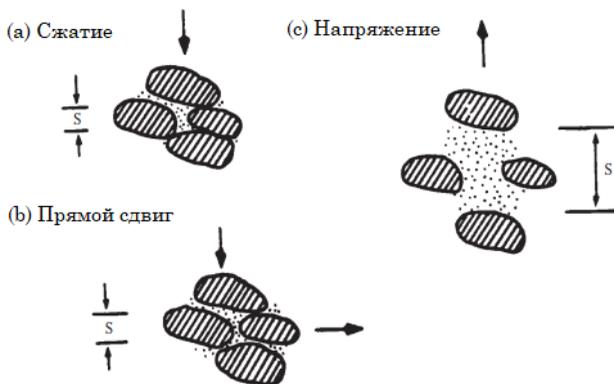


Рисунок 5.18. Схема, иллюстрирующая методы испытаний, осуществляемых под нагрузкой на площади контакта между частицами почвы: (а) испытание сжатием; (б) прямое испытание сдвигом; (с) испытание растяжением.

На рисунке 5.18 показывается, что испытание на растяжение дает большую площадь контакта в процессе нагружения, чем испытания на неограниченное сжатие и прямое сдвиговое усилие. При сравнении этих результатов испытаний термин «чувствительность прочности» (Δs) выбран как показатель чувствительности почвы к нагрузке. Чувствительность силы определяется следующим образом:

$$\Delta s = S_{\text{ОМС}} - S\omega/S_{\text{ОМС}} \quad (5.7)$$

где Δs – чувствительность прочности, $S_{\text{ОМС}}$ – прочность на сдвиг при оптимальном содержании влаги (ОМС) и $S\omega$ = прочность на сдвиг при любом заданном содержании влаги.

Оба теста на прочность на сдвиг определяются одним и тем же типом процедуры испытания на сдвиг. На рисунке 5.19 показаны зависимости содержания влаги ниже ОМС (сухая сторона) и над ОМС (влажная сторона) от чувствительности прочности (Δs). ОМС определяется стандартным испытанием на уплотнение. Используемыми параметрами прочности являются когезия (c), неограниченная прочность на сжатие (q_u) и прочность на растяжение (σ_t) от испытаний на прямой сдвиг, неограниченное сжатие и растяжение соответственно. При рассмотрении рисунка 5.19, вне зависимости от того, выше ли или ниже ОМС содержание влаги, предел прочности на растяжение более чувствителен по отношению к содержанию влаги по сравнению с другими испытаниями на прямой сдвиг и неограниченное сжатие. Как говорилось, испытание на растяжение имеет большую площадь контакта между частицами почвы, поэтому дает больше шансов для реакции почвы с контактом влаги в процессе нагружения.

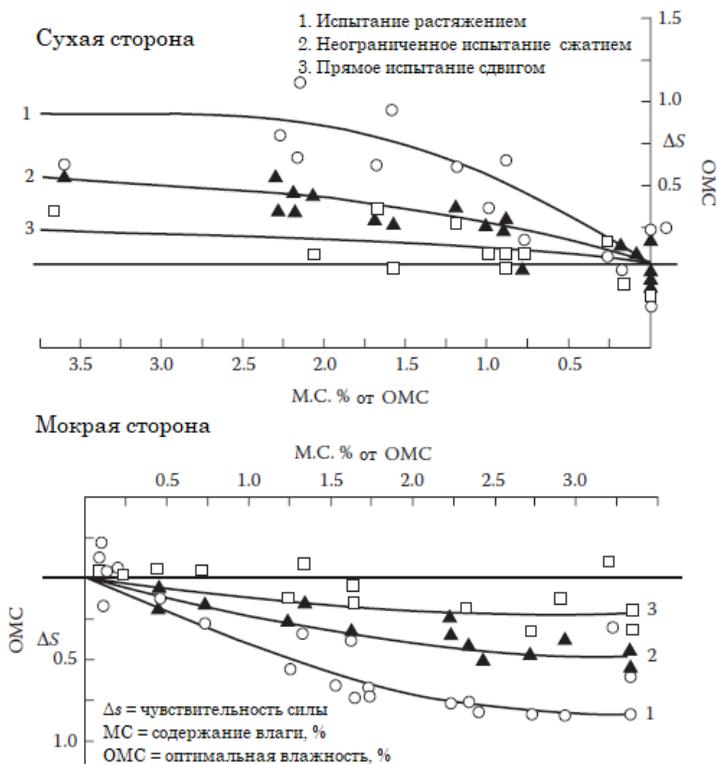


Рисунок 5.19. Лабораторные экспериментальные данные для иллюстрации чувствительности почвы к типу методов испытаний (по Fang [1991b], Proc. 1st Canadian Conf. on Environmental Geotechnics, Montreal, Canada, May, 18 p.)

5.12.3. Чувствительность почвы к поровой жидкости

В традиционной геотехнической инженерии предполагается, что параметры почвы, такие как удельный вес и пределы Аттерберга, являются постоянными для данной почвы при любых условиях окружающей среды. Однако результаты в различных публикациях показывают, что эти параметры не являются постоянными для каждого конкретного грунта и изменяются при изменении поровой жидкости или других условий окружающей среды. Чтобы понять степень чувствительности почвы к поровой жидкости, рассматриваются и обсуждаются основные характеристики взаимодействий почвы и поровой жидкости.

Rosenquist (1953) представляет значительную исследовательскую работу, касающуюся формирования и поведения норвежских быстрых глин, сделанную в 1940-х и начале 1950-х годов. В результате этих исследований влияние концентрации соли или концентрации электролита на поведение глины было рассмотрено среди многих других факторов. Влияние концентрации электролита на поведение глины представляет интерес в данной работе. Было показано, что увеличение концентрации электролита в поровой жидкости увеличивает верхний предел пластичности (LL) почвы. LL – это измерение прочности на сдвиг. Это – мера содержания воды, при которой при данной энергии происходит определенный тип разрушения при сдвиге. Следовательно, если LL увеличивается с увеличением концентрации электролита, это означает, что для того, чтобы в почве произошло разрушение при сдвиге, требовалось более высокое содержание влаги при более высокой концентрации электролита.

В исследовании Lambe (1953), посвященном влиянию полимеров на свойства почвы, был оценен их потенциал как метод улучшения почвы. Утверждается, что анионные акрилатные группы полимера усиливают межчастичные связи через присутствующие поливалентные катионы. Следовательно, они очень эффективны в вызывании тенденции флокуляции или агрегации почвы.

Matsuo (1957) пишет о влиянии хлорида натрия, хлорида калия, соляной кислоты, хлорида кальция и хлорида магния в растворе на пределы Аттерберга трех японских почв. Исследование включало различные концентрации каждого из электролитических растворов и их влияние на верхний предел пластичности, предел пластичности и, следовательно, индекс пластичности.

Andrews и соавторы (1967) сравнили взаимодействие трех глинистых минералов с тремя поровыми жидкостями. Поровыми флюидами были вода, диметилсульфоксид (DMSO) и диметилформамид (DMF). В качестве глинистых минералов использовали каолинит, аттапулгит и монтмориллонит натрия. И DMSO, и DMF являются кислотными растворителями. Типичные результаты испытаний воздействия на почвенные константы приведены в таблице 5.7.

Vees и Winterkorn (1967) подготовили четыре образца глины в виде гомоионных глин (раздел 4.6). Таким образом, они могли бы изучить влияние катионного обмена на различные свойства почвы, включая пределы Аттерберга, крекинг, сорбцию, гидравлическую и тепловую проводимость, испытания на консолидацию и сдвиг. В зависимости от первичного иона, как верхний предел пластичности, так и предел пластичности варьируются. Для каолинита PL увеличивается с увеличением валентности обменного иона. Влияние поровых жидкостей на другие параметры будет обсуждаться в следующих главах.

Torrance (1975) изучал влияние химического состава поровой жидкости на поведение чувствительных морских глин Канады и Скандинавии. Испытания на предельное содержание жидкости проводились на глине Лада с использованием

ее естественной поровой жидкости, а также растворов электролитов различных солей. Можно видеть, что с увеличением концентрации электролита в растворе, LL увеличивается.

Griffin и соавторы (1976) представляют серию лабораторных тестов на выщелачивание, чтобы оценить потенциал различных глинистых минералов для ослабления химических компонентов в проникающем веществе. В испытании использовался выщелачиватель из санитарной свалки, пропитывающий каолиновые, иллитовые и монтмориллонитовые глины в матрице из кварцевого песка. Перед проникновением глинистые минеральные структуры анализировали дифракцией рентгеновских лучей для оценки способных к обмену ионов. Исследование показало, что хлорид, натрий и водорастворимые органические вещества были относительно непривлекательными. Калий, аммоний, магний, кремний и железо были умеренно ослаблены. Наконец, тяжелые металлы, такие как свинец, кадмий, ртуть и цинк, были сильно ослаблены. И наоборот, содержание в сточных водах кальция, бора и марганца было значительно выше, чем в исходном фильтрате. Монтмориллонит был более эффективным в ослаблении химических компонентов, затем следовали иллит и каолинит. Увеличение эффективности в ослаблении химических составляющих напрямую связано с катионообменной способностью глинистого минерала. Основным механизмом ослабления были осаждение металлов и обмен катионов для других ослабленных химических компонентов.

Таблица 5.7. Влияние поровых жидкостей на удельный вес и верхний предел пластичности

Полезные ископаемые	Поровая жидкость	ω_L	ω_p	I_p	ω_s	G_s	V_s
Каолинит	H ₂ O	62	33	29	29	2,61	0,383
	DMSO	105	50	55	—	2,59	0,386
Аттапульгит	H ₂ O	291	110	181	80	2,61	0,383
	DMSO	309	155	154	—	2,57	0,389
Na-бентонит	H ₂ O	506	55	451	6	2,51	0,383
	DMSO	140	80	60	—	2,92	0,342

Примечание: ω_L = верхний предел пластичности, ω_p = предел пластичности, I_p = индекс пластичности, ω_s = предел усадки, G_s = удельный вес, V_s = удельный объем, H₂O – вода, DMSO – диметилсульфоксид, (CH₃)₂SO.

Источник: по Andrews, R. E., Gawarkiewicz, J. J. and Winterkorn, H. F. (1967), Comparison of the interaction of three clay minerals with water, dimethyl sulfoxide, and dimethyl formamide, HRR № 209, pp. 66–78.

Fuller (1978) провел исследование, аналогичное исследованию, проведенному Griffin и соавторами (1976). Фильтры были использованы для проникновения в 11 различных природных глинистых почв. Продукт выщелачивания вырабатывался в септике типа домовладельца и время от времени содержал различные химические составляющие. Почвы были проанализированы для оценки их глинистой минералогической структуры до проникновения. Было установлено, что типы глинистых минералов в катионообменной емкости были среди наименее важных факторов в ослаблении химических компонентов из фильтрата. Однако количество глины в образце почвы считалось наиболее важным фактором.

5.13. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОЧВА–ВОДА–ВОЗДУХ

5.13.1. Поведение воздуха в почвенно-водной системе

Глинистые минералы устанавливают различные равновесия при контакте с водным веществом в газовой или жидкой фазе, если в первом случае не происходит капиллярной конденсации. Газовая фаза состоит в основном из мономера H_2O , тогда как в жидкой фазе всю когерентную массу доступной воды можно рассматривать как одну полимерную молекулу воды. Winterkorn (1958) представляет лабораторные эксперименты по адсорбции пара под давлением 30 мм ртутного столба. Результаты показывают адсорбцию пара в зависимости от температуры для четырех типов гомоионных почв (рисунок 5.20). Во всех случаях адсорбция пара уменьшается с ростом температуры при постоянном давлении.

На рисунке 5.21 представлена схема, иллюстрирующая прогрессирующее выделение газа (воздуха) в почве. Выделяются четыре шага, как показано на рисунке 5.21. Rau и Chaney (1988) наблюдали содержание пузырьков воздуха в морской глине. От стадии 2 до стадии 3, когда газ (воздух) выделяется в форме пузырьков, объем поровой жидкости значительно увеличивается.

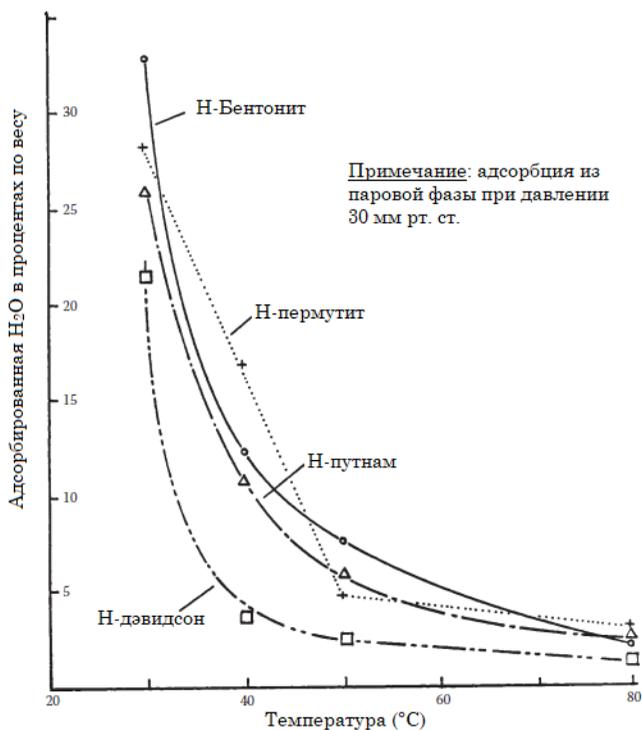


Рисунок 5.20. Влияние температуры на адсорбцию воды (данные из: Winterkorn, Н. Ф. [1958], HRB Special Report 40, pp. 324–338. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не защищен авторскими правами).

5.13.2. Взаимодействие почва–вода–пар

Теория движения воды дистилляционно-конденсационного типа в паровой фазе была изучена Дерягиным и Мельниковой (1958) и Hallaire (1958). Вода может проникать в почву и выходить из нее в твердой, жидкой или паровой фазе. Движение паровой фазы может быть связано с градиентами относительной влажности почвенного воздуха, вызванными различиями температуры и содержания влаги, а также стремлением воды к внутренней поверхности почвы, проходящими воздушными потоками или перекачкой воздуха в почву и из нее в результате изменения давления в атмосфере или биосфере. В общем, движение пара только за счет диффузии обычно не очень важно; однако конвекционное движение может иметь большое значение в условиях, описанных в разделах 8.8.6 и 18.10.

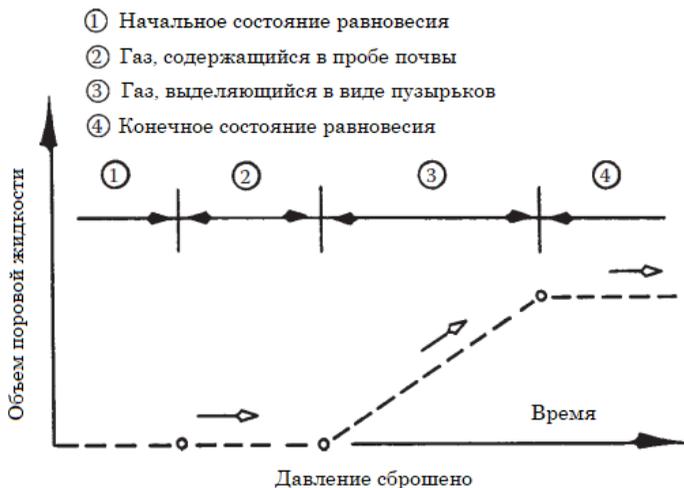


Рисунок 5.21. Процесс выброса газа в почву (по Raai, G. and Chaney, R. C. [1988], ASTM STP 977, pp. 338–352).

5.14. РЕЗЮМЕ

1. Молекула воды является двусторонней электрической структурой. Эта молекула обладает электрической полярностью. Взаимодействие между жидкостью и твердым веществом может происходить только на поверхности твердого тела.

2. Для оценки системы почва–вода мы должны рассматривать почвенный элемент в три этапа: твердое вещество, жидкость и газ. Жидкая часть может быть разделена на две части: гравитационная вода и вода окружающей среды. Экологические воды находятся под сильным влиянием местных условий окружающей среды. Данная область, скорее всего, является местом для ионного обмена и бактериальной активности.

3. Взаимодействие почвы и воды происходит в различных энергетических полях, и электрохимические свойства играют важную роль при взаимодействии почвы и воды в окружающей среде.

4. Чувствительность почвы к окружающей среде зависит не только от окружающей среды, но и от структурной единицы глинистого минерала (размер частиц, энергия связи между частицами и ионообменная емкость). Чем меньше частица, тем больше у нее шансов взаимодействовать с окружающей средой, и чем слабее энергия связи между частицами или чем выше ионообменная емкость, тем более она чувствительна к окружающей среде.

5. Геоморфологические процессы (процесс старения) можно разделить на пять возможных процессов, которые могут происходить с почвой и горными породами: механический, химический, физико-химический, геомикробиологический и почвообразование. Каждый процесс, относящийся к системе почва–порода, обсуждается в главе.

6. При изучении взаимодействия почва–вода–газ предполагается, что вода в газовой фазе состоит в основном из мономера H_2O , тогда как в жидкой фазе всю когерентную массу имеющейся воды можно рассматривать как одну полимерную молекулу воды.

ПРОБЛЕМАТИКА

5.1. Какие распространенные растворенные газы содержатся в природной воде? Является ли питьевая вода чистой водой?

5.2. Что такое жесткая вода и что такое мягкая вода? Как и почему жесткая вода повреждает фундаментные конструкции? Почему речная и озерная воды имеют существенно разные характеристики?

5.3. Если в пол-литровом образце водного раствора содержится 2,2 мг фторид-иона, каковы доли на миллион (ppm) фторида в водном растворе?

5.4. Какова динамическая вязкость чистой воды при 4°C ? Какова абсолютная вязкость той же воды при 15°C ?

5.5. Что такое $[\text{H}^+]$ раствора с $\text{pH} = 6$? Что такое $[\text{OH}^-]$ раствора с $\text{pH} = 9$? Каков pH раствора HNO_3 0,0075 моль/л?

5.6. Объясните, почему некоторые почвы чувствительны к влаге, что отражается на их прочности на сдвиг, изменении объема и других геотехнических свойствах, а другие не чувствительны?

5.8. Почему отмечается потеря прочности, когда почва пропитана влагой, но ей не разрешается набухать после уплотнения?

5.9. Образец сухой почвы, имеющий удельный вес $1,62 \text{ г/см}^3$ и удельную плотность 2,70, помещается под дождь. Во время дождя объем образца остается постоянным, но степень насыщения увеличивается до 40 %. Определите удельный вес и содержание воды в почве после дождя.

5.10. Каждый из четырех образцов почвы имеет коэффициент пустотности 0,75 и удельный вес 2,72 со степенями насыщения 70, 80, 90 и 100 %. Определите единицу веса для каждого из четырех образцов.

6. Характеристики усадки, набухания и растрескивания почвы

6.1. Введение

Факторы окружающей среды значительно влияют на объем почвы, характеризующийся такими явлениями как усадка, вздутие и растрескивание. Однако все эти явления связаны с влажностью почвы. Усадка и разбухание были известны геотехнике в течение многих лет, но поведение при растрескивании стало изучаться относительно недавно. Чтобы охарактеризовать трещину, необходимо изучить сорбцию, растяжение и разрушение почвы. Принципиальная схема иллюстрирует взаимосвязь между усадкой и набуханием, как показано на рисунке 6.1. Процесс усадки вызван тепловой энергией, однако процесс набухания вызван энергией нескольких сред, поэтому оба эти процесса связаны с содержанием влаги, но они не являются обратимыми. Причины усадки и разбухания, в основном, связаны с направлениями пути потока, как описано в разделе 5.6 и показано на рисунке 5.7. Взаимосвязь между явлениями растрескивания и разрушения показана на схематической диаграмме (рисунок 6.2). Подробные пояснения к рисунку 6.2 будут представлены в разделе 6.9. В этой главе основное внимание уделяется механизмам усадки, набухания, растрескивания и разрушения, а также характеристикам сорбции и растяжения почв с особым вниманием к загрязненным мелкозернистым почвам.

6.2. УСАДКА

6.2.1. Характеристики усадки почвы

Усадка является одной из основных причин изменения объема, связанных с изменениями содержания воды в почве. Haines (1923), Casagrande (1932) и Hogentogler (1937a) показали, что когда в почве уменьшается содержание воды, уменьшается ее объем. На основании работ Haines и Hogentogler, изменения объема, связанные с консистенцией почвы, могут быть проиллюстрированы, как показано на рисунке 6.3. Соотношения между различными показателями влажности почвы являются приблизительными. Как видно из рисунка 6.3, от точек a до b происходит нормальная усадка, а объем изменяется линейно с уменьшением содержания воды. Эта линейная усадка обусловлена силами поверхностного натяжения капиллярной влаги. Когда изменение объема достигает точки b , цвет почвы меняется. Дополнительное небольшое изменение объема происходит от точек b до d . Это изменение объема называется либо остаточной усадкой, либо криволинейной усадкой. Дальнейшее уменьшение воды происходит до тех пор, пока не прекратится изменение объема, то есть не будет достигнут предел усадки (SL) (ASTM D427), соответствующий точке c . SL может использоваться в качестве общего показателя содержания глины, и, как правило, он уменьшается с увеличением содержания глины.

Наклон прямой линии (от точек a до b) изменения объема и кривой консистенции грунта на рисунке 6.1 называется коэффициентом усадки (R_s). Эта величина изменяется в узких пределах при нормальных условиях окружающей среды. Например, R_s для грязной почвы – 1,42, для черной хлопковой глины

(раздел 13.4) из Индии – 2,1, а для илистой глины из дорожного теста AASHTO – 1,95.

6.2.2. Факторы, влияющие на усадку почвы

В общем, усадка уменьшается с увеличением содержания глины. Помимо содержания глины, выделяют и другие факторы, влияющие на характеристики усадки, а именно процесс высыхания, ориентацию частиц почвы, удельный вес и поровые жидкости, а также обменные ионы. Rao (1979), сообщая об экспериментальных результатах, касающихся каолиновых и монтмориллонитовых глин, показывает, что на пределы усадки влияют изменения в строении горной породы, начальном содержании воды и давлении уплотнения. Объемное изменение в зависимости от pH для трех основных глинистых минералов показано на рисунке 6.4. Обзор рисунка 6.4 показывает, что для трех протестированных глин (1) изменение объема является максимальным при низком (кислотном) и высоком (основном) pH, а (2) изменение объема минимально при pH, приблизительно равном 6,0. Кроме того, предел усадки в зависимости от активности как естественных, так и гомойонных почв (подпочвы маршалла) показан на рисунке 6.5. Рисунок 6.5 показывает, что предел усадки уменьшается с увеличением активности (A).

Взаимосвязь предела усадки, коэффициента усадки, удельного веса сухого вещества и удельного веса твердых веществ может быть рассчитана на основе отношения воздух – вода – твердое вещество, как описано в большинстве стандартных учебников. Кроме того, процедура измерения усадки была стандартизирована как ASTM (ASTM D427), так и AASHTO (AASHTO T92). Трещины почвы, вызванные усадкой, будут обсуждаться в следующем разделе этой главы. Для некоторых почв, которые показали более высокую скорость изменения объема в естественном состоянии, скорость объемной усадки связана с начальным содержанием влаги. Когда начальное содержание влаги выше, скорость объемной усадки также выше.



Рисунок 6.1. Схема иллюстрирует связь между процессами усадки и набухания.



Рисунок 6.2. Схема иллюстрирует взаимосвязь между явлениями растрескивания и разрушения.



Рисунок 6.3. Изменение объема в зависимости от содержания воды (основано на данных: Haines [1923]; Hogentogler, C. A., Jr. [1937b], Engineering Properties of Soil, McGraw-Hill, New York).

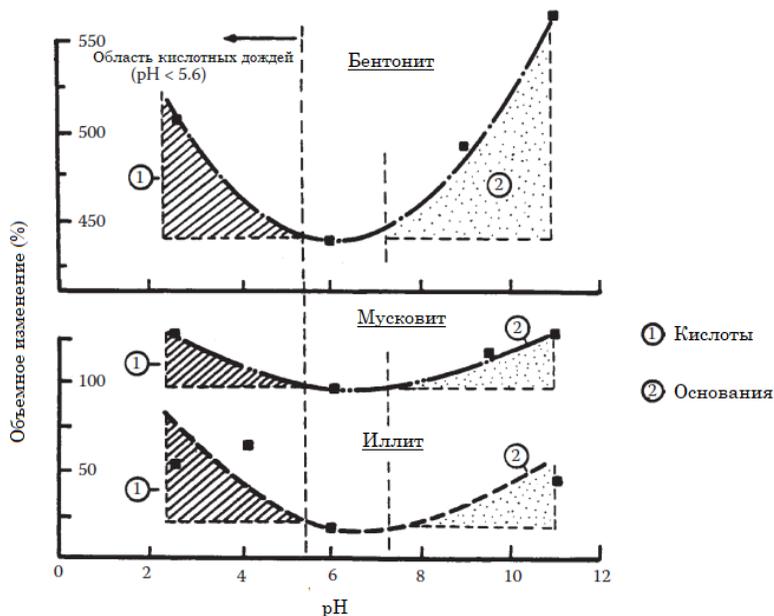


Рисунок 6.4. Объемное изменение в зависимости от значения рН для трех основных глинистых минералов (по Fang [1989a], Proc. 2nd Int. Symp. Environ. Geotechnol., v. 1, pp. 167–194. С разрешения ASCE).

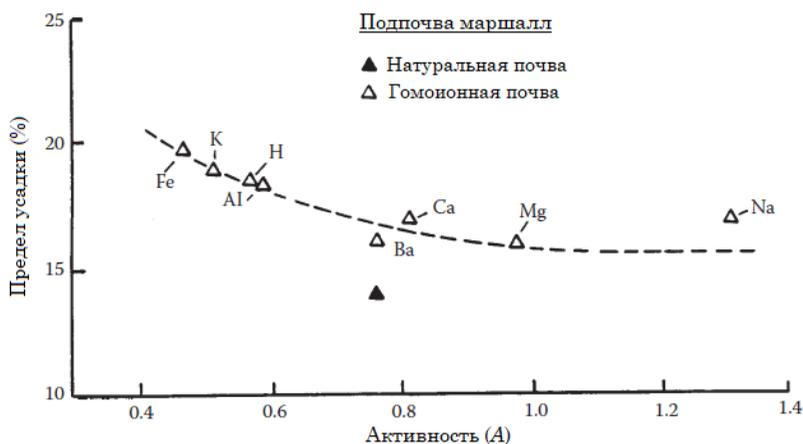


Рисунок 6.5. Предел усадки в зависимости от активности для природных и гомоионных почв (данные из таблицы 4.8).

6.3. ХАРАКТЕРИСТИКИ НАБУХАНИЯ

6.3.1. Механизм набухания

Когда почва теряет воду, ее объем уменьшается. Однако, если вода добавляется к сухой почве, объем почвы увеличивается; это явление называется *набухание*. Как отмечалось в предыдущем разделе, механизм процесса набухания является более сложным по сравнению с процессом усадки.

Набухание почвы – это самопроизвольный процесс, происходящий, когда такие условия уменьшают свободную энергию или увеличивают энтропию системы. Скорость процесса прямо пропорциональна доступной свободной энергии и уменьшается по мере ее преобразования. Это имеет два последствия.

1. Скорость набухания уменьшается со временем.

2. Давление набухания, являющееся мерой свободной энергии, также уменьшается. Скорость набухания контролируется доступными средствами подачи и потери влаги за счет сопротивления системы для получения режима проводимости воды.

Существуют многочисленные методы изучения и определения набухания почв и классификации набухания почв или обширных глин. Дальнейшие обсуждения происхождения, связанные с геологией, представлены в разделе 13.4.

6.3.2. Измерения набухания

Методы измерения набухания можно разделить на две основные группы: прямые и косвенные измерения. Прямые измерения используют одномерные изменения объема в сочетании со стандартным уплотнением, CBR-тестом или консолидационным тестом, как пишут в стандартных учебниках. Косвенными методами, используемыми для измерения связанных свойств почвы, являются минералогический метод (Seed и Goodman, 1964), эквивалент влажности центрифуги (PCA, 1962, 1992) и дисперсия диэлектрика (Fernando и соавторы, 1975).

Корреляция набухания или сжатия с типами почвы и другими параметрами изучалась многими исследователями. Dakshanamurthy (1979) утверждает, что зависимость между максимальным объемным набуханием и средним нормальным напряжением указывает на то, что максимальное осевое и радиальное набухание уменьшаются экспоненциально с увеличением среднего нормального напряжения. Это соотношение зависит от отношения основного напряжения (отношения основного напряжения к незначительному главному напряжению в аппарате трехосных клеток). Было обнаружено, что коэффициент набухания (отношения осевого набухания к радиальному набуханию) со временем уменьшается. Коэффициент набухания достигает равновесного значения, называемого «равновесным коэффициентом набухания», который является функцией граничных условий нагружения.

6.3.3. Факторы, влияющие на характеристики набухания почвы

Факторы, влияющие на характеристики набухания, многочисленны. Среди этих факторов наиболее важными являются влажность, удельный вес почвы, поровая жидкость и обменные ионы. Baver и Winterkorn (1935) представляют влияние обменных ионов на набухание почвы и другие коллоидные свойства, такие как вязкость (раздел 5.3) и дзета-потенциал (раздел 9.8) глины путнам, как показано на рисунке 6.6. При рассмотрении рисунка 6.6 становится понятно, что свойства набухания глины путнам изменяются в зависимости от количества обменных ионов Li и K. Установлено, что добавление иона Li приводит к гораздо большим изменениям по сравнению с добавлением иона K. В таблице 6.1 представлены свойства набухания Gila, преимущественно монтмориллонитовой почвы, при макроскопическом набухании (грамм поглощенной воды / грамм почвы). Данные в таблице 6.1 показывают, что низкие концентрации соли и высокое содержание натрия в фильтрате способствуют набуханию глины (McNeal и соавторы, 1966).

Влияние типов минералов на свойства набухания дополнительно изучается с использованием трех основных глинистых минералов, включая монтмориллонит, иллит и каолинит, как показано на рисунке 6.7. На рисунке 6.7 показаны значительные результаты сравнения монтмориллонитовой и каолиновой глин, поскольку монтмориллонит более чувствителен к окружающей среде, чем иллит и каолинит, как отмечалось в разделе 5.12. Asar и Olivieri (1989) представляют данные о свободном набухании в зависимости от диэлектрической проницаемости, это будет обсуждаться в разделе 9.7.

Quirk и Schofield (1955) предположили, что набухание глины может снизить гидравлическую проводимость, вызывая закупорку пустот пор. McNeal и Coleman (1966), основываясь на работе Quirk и Schofield, применили различные концентрации растворов натриево-кальциевых солей с разным процентом обменного натрия на семи разных почвах, которые различались по содержанию глины. Сравнивая относительную чувствительность почв к изменениям гидравлической проводимости, McNeal и Coleman пришли к выводу, что (1) почвы с высоким содержанием каолинита и полуторной окиси или аморфных минералов выглядят стабильными, (2) почвы с высоким содержанием монтмориллонита выглядят очень чувствительными к изменениям проводимости, (3) почвы с высоким содержанием решетчатых глин 2:1 с умеренным количеством монтмориллонита были промежуточными по своему поведению.

Удержание почвы частично обусловлено силами набухания и частично капиллярными силами. Вода сохраняется и в матрице из ила и мелкого песка, но в гораздо меньшей степени, чем глинистые почвы. Способность удерживать почву и время удержания важны и будут обсуждаться в разделе 7.4.

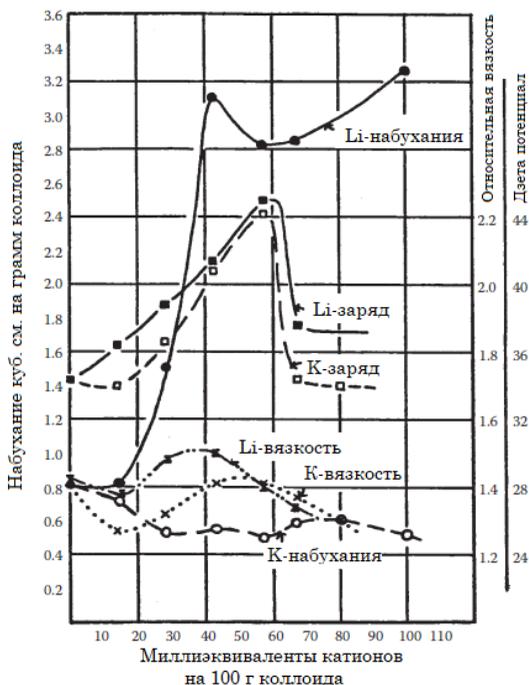


Рисунок 6.6. Коллоидные свойства глин путнам, на которые влияют различные количества обменных ионов Li и K (по Bayer, L. D. and Winterkorn, H. F. [1935], Soil Sci., v. 40, № 5, pp. 403–419).

Таблица 6.1. Макроскопическое набухание джилы, преимущественно монтмориллонитовой почвы

Концентрация солей (мэкв/л)	Набухание (г/г)	Концентрация солей (мэкв/л)	Набухание (г/г)
SAR = 0		SAR = 50	
800	0,00		
200	0,02	800	0,00
50	0,02	200	0,14
12,5	0,04	50	0,65
3,13	0,06	12,5	2,00
SAR = 15		SAR = 100	
800	0,00		
12,5	0,12	800	0,00
3,13	0,84	200	0,28
		50	1,50
		12,5	2,44
SAR = 25		SAR = 00	
800	0,00		
200	0,05	800	0,00
50	0,08	200	0,91
12,5	0,56	50	2,04
3,13	1,84	12,5	2,70

Примечание: SAR – коэффициент адсорбции натрия.

Источник: по McNeal, B. L. et al. (1966), Proc. SSSA, v. 30, pp. 313–317.

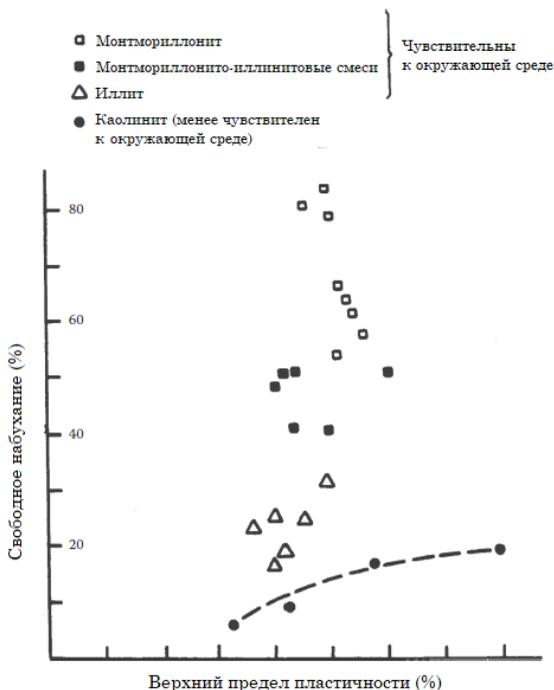


Рисунок 6.7. Чувствительность некоторых почв к окружающей среде, отраженная по результатам испытаний на разбухание по сравнению с верхним пределом пластичности (данные из: Tongji University [1979], Soil Properties and Mechanics, Shanghai, China).

6.4. СОРБЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

6.4.1. Сорбция воды

Взаимодействие почвы и воды в окружающей среде, как обсуждалось в предыдущей главе, зависит от характеристик реакций сорбции, поглощения и адсорбции почвы. Эти реакции также зависят от типа почвы, размера частиц и характеристик сцепления. Как показано на рисунке 4.5, процесс сорбции охватывает процессы как поглощения, так и адсорбции. Vees и Winterkorn (1967) представили серию лабораторных экспериментов на гомоионных модификационных глинах, что отражено на рисунке 6.8.

На рисунке 6.8a показана сорбция аттапульгита водой в зависимости от типа обменного иона и времени. Т-гомоионная глина показывает самую высокую начальную скорость сорбции и одно из самых низких конечных значений потребления (рисунок 6.8b). Этого и следовало ожидать из-за ее флокулированной структуры и низкого стремления к воде. Для других ионов картина не такая четкая. Это связано с взаимодействием процессов поглощения и адсорбции в зависимости от типа ионообменной реакции в почве. Принимая во внимание

относительно низкую ионообменную емкость каолинита, наблюдаемый ионный эффект, по-видимому, значительным образом зависит от типа вторичной структуры, вызванной различными катионами, а не от индивидуального стремления воды самих ионов.

Особый интерес представляет близость по скорости и конечным объемам сорбции воды натриевого и магниевого каолинитов, что указывает на сходство стремления к воде, которое наблюдалось в других случаях. На рисунке 6.8b представлен предельный объем потребления для каолинита в зависимости от времени. Максимальный объем потребления определяется упругостью игольчатых кристаллитов и сформированной ими фетровой структуры. Эта упругость увеличивается с увеличением валентности обменных ионов, в то время как стремление к воде глинистых минеральных поверхностей уменьшается. Соответственно, скорость потребления воды, а также предельный объем увеличивается с увеличением валентности ионного обмена.

6.4.2. Поглощение и степень насыщения

Поглощение определяется как впитывание через поры или другие пустоты. В геотехнической инженерии термин «поглощение» используется очень свободно. Степень насыщения обычно используется как показатель водопоглощения почвы, как показано на рисунке 6.9. На рисунке 6.9 указываются признаки того, что процесс поглощения является функцией времени; следовательно, степень насыщения может охватывать как абсорбционное, так и адсорбционное взаимодействие. Это особенно актуально для мелкозернистых почв. Пунктирная вертикальная линия, проведенная на рисунке 6.9, указывает на возможную разделительную границу между явлениями поглощения и адсорбции. Следует отметить, что срок насыщения и сорбции аналогичен в геотехнической инженерии, которая включает в себя как характеристики поглощения, так и адсорбции.

6.4.3. Поглощение органических молекул

Как обсуждалось в разделах 4.9 и 5.6, гидратированная глина содержит межслойные катионы, окруженные молекулами воды, катионы удовлетворяют отрицательному заряду на поверхности глины через атомы водорода координированных молекул воды. Velde (1992) объяснил, что, когда органические молекулы помещаются в водный раствор, вода и органический материал конкурируют за межслойный участок. Поскольку пропорция воды и органического материала изменяется в пользу последнего, он включается в промежуточные участки.

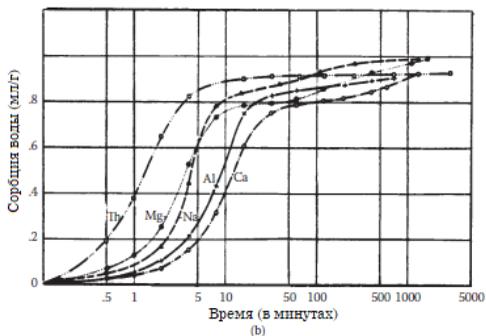
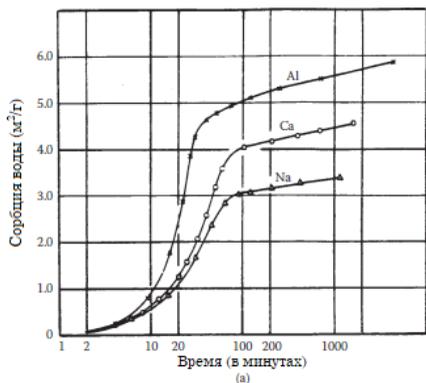


Рисунок 6.8. Сорбция воды в зависимости от типа обменных ионов и времени: (а) аттапульгит и (b) каолинит (по Vees, E. and Winterkorn, H. F. [1967], Engineering Properties of Several Pure Clays as Functions of Mineral Type, Exchange Ions and Phase Composition, HRR № 209, pp. 55–65. Этот материал является собственностью Правительство США, но находится в свободном доступе и не подлежит защите авторских прав).

6.5. ЯВЛЕНИЕ АДСОРБЦИИ

6.5.1. Типы адсорбции

Адсорбция определяется как усвоение вещества (то есть газа, пара или растворенного вещества) на поверхности твердого тела или жидкости. Это равномерное проникновение молекул одной фазы в пространство между молекулами второй фазы. Чтобы частица почвы испытывала большую адсорбцию, необходимо, чтобы она имела большую площадь поверхности. Следовательно, мелкозернистая почва обладает большей адсорбционной способностью, чем более крупные частицы почвы. Для понимания данного явления должны быть рассмотрены следующие факторы:

- природа адсорбента;
- природа вещества, которое адсорбируется;
- площадь поверхности адсорбента;
- температура;
- давление.

Как правило, снижение температуры или повышение давления увеличивает степень адсорбции. Известно два типа адсорбции, а именно физическая и физико-химическая адсорбция, но они определены слабо.

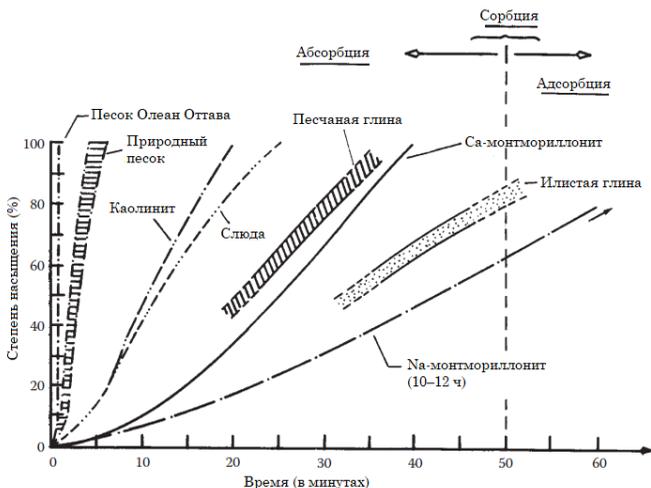


Рисунок 6.9. Степень насыщения в зависимости от времени

6.5.1.1. Физическая адсорбция

Этот тип адсорбции также называют адсорбцией Ван-дер-Ваальса. Она характеризуется низкими теплотами адсорбции, при которых поверхность постепенно покрывается слоем молекул, удерживаемых на месте силами Ван-дер-Ваальса. Поскольку силы Ван-дер-Ваальса имеют слабую энергию связи, физическая адсорбция не может оказывать достаточно сильного энергетического воздействия на адсорбированные молекулы, чтобы существенно влиять на их химические свойства.

6.5.1.2. Химическая или активированная адсорбция

Химическая адсорбция намного сильнее физической адсорбции, которая характеризуется теплотой адсорбции от 10 до 100 ккал на моль газа (Porterfield, 1972). Это сравнимо по величине с теплотой образования химического соединения. Также считается, что химическая адсорбция представляет собой комбинацию молекул газа с поверхностными атомами с образованием поверхностного соединения. Физическая адсорбция распространена при низких температурах, а химическая адсорбция распространена при высоких температурах, однако физическая адсорбция при низкой температуре может при повышении температуры переходить в химическую адсорбцию.

6.5.2. Адсорбционный механизм

Рисунок 6.10 иллюстрирует интенсивность адсорбции вокруг поверхности частицы. Механизм адсорбционных явлений в почвенно-водной системе представлен далее.

1. Большие силы адсорбции, воздействующие на молекулы воды поверхностями твердых частиц почвы, действуют аналогично внешнему давлению, то есть они могут разжижать твердую воду или затвердевать жидкую.

2. Силы адсорбции такой величины, при которой при 45°C и давлении 12000 кг/см² затвердевает вода, не являются чем-то необычным на поверхности частиц почвы (таблица 6.2).

3. Все физические свойства связных грунтов (механические, электрические, оптические и акустические) функционально связаны с поведением водного вещества в условиях сильного давления. Электрические и магнитные поля существуют на поверхности твердых частиц в почвах.

4. Вода в системе почва–вода никогда не бывает чистой, но удерживает материалы в растворе и дисперсии. Растворенные материалы в основном представляют собой соли и кислоты. Слои воды рядом с твердыми частицами находятся под высоким давлением адсорбции, которое может быть больше, чем 25000 кг/см². Вода может находиться в твердом состоянии при температуре выше 50°C. Силы адсорбции уменьшаются экспоненциально до примерно 50 кг/см² при гигроскопическом содержании влаги и, следовательно, более медленно уменьшаются до нуля для содержания воды, при котором система грунт–вода ведет себя по существу как жидкость (верхний предел пластичности). Путь от гигроскопического влагосодержания к влагэквиваленту представлен в таблице 6.2.

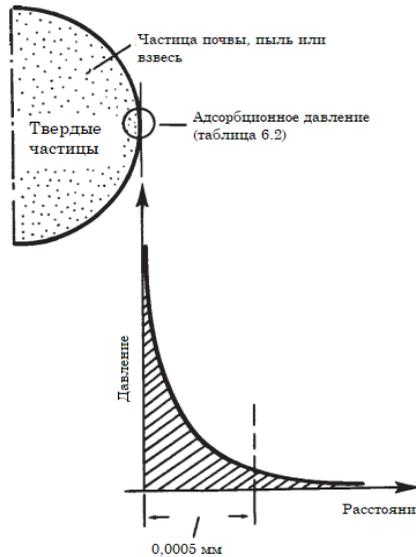


Рисунок 6.10. Схема иллюстрирует интенсивность адсорбции вокруг поверхности частицы.

Таблица 6.2. Адсорбционное давление на поверхности почвы при различной влажности и условиях окружающей среды.

Условие	Адсорбционное давление	Ссылка
Гигроскопичность	50 кг/см ²	Blanck (1939)
Постоянная точка увядания	12,50 кг/см ²	
Точка увядания (мертвая вода)	6,25 кг/см ²	
Вакуумный эквивалент влажности	0,55 кг/см ²	
Влажный климат	25000 фунтов на квадратный дюйм	Winterkorn (1955)
Твердеет вода (45°C)	12000 фунтов на квадратный дюйм	

6.5.3. Измерения адсорбции

Существуют различные методы измерения адсорбции почвы, например, процедуры пакетной адсорбции для оценки адсорбции почвы химикатами (Limousin и соавторы, 2007). Применение этих методов занимает много времени. Для сравнения обсуждаются как абсорбционные, так и адсорбционные методы. Предложены альтернативные процедуры для оценки как поглощения, так и адсорбции (Fang, 1993) с использованием существующих стандартных процедур ASTM, полевого эквивалента влаги (FME) (ASTM D426; AASHTO T93) и центрифужного эквивалента влаги (CME) (ASTM D425; AASHTO T94) для обозначения абсорбционных и адсорбционных явлений для почв. Представлено краткое обсуждение и обоснование того, как эти процедуры могут быть использованы для этих целей.

6.5.3.1. Абсорбция, относящаяся к FME

Используя полевой эквивалент влажности (FME), можно оценить характеристики поглощения почвы. FME является одной из ранних стандартизированных методик испытаний, установленных ASTM в 1939 году. FME почвы определяется как минимальное содержание влаги, выраженное в процентах от высушенной в печи почвы, когда капля воды, помещенная на гладкую поверхность почвы, не будет немедленно поглощаться почвой, а будет распространяться по всей поверхности почвы и придавать ей блестящий вид.

6.5.3.2. Адсорбция, относящаяся к CME

Эквивалент влажности центрифуги (CME) – это содержание влаги в почве после центрифугирования насыщенного образца в течение одного часа под действием силы, в 1000 раз превышающей силу тяжести (g). Этот тест используется для структурной классификации почв. Значение ниже 12 указывает на проницаемые пески и илы, а значение больше 25 указывает на непроницаемые глины с высокой капиллярностью. Значения CME могут достигать 68 для мягких морских глин из Мексиканского залива и 56 из залива Мэн (раздел 14.4). Исследование также показывает, что когда FME и CME превышают 30, а FME больше CME, почва, вероятно, расширяется после освобождения и должна быть классифицирована как обширная почва (раздел 13.6). Кроме того, FME, будучи больше, чем верхний предел пластичности (LL), указывает на опасность аутогенного разжижения почвы в присутствии свободной воды (таблица 6.3; Winterkorn и Fang (1991)). Значение FME аналогично CME, поскольку оно является качественным индикаторным свойством, которое должно коррелировать с характеристиками почвы, чтобы иметь существенное значение.

6.5.4. Адсорбционные характеристики в окружающей среде

6.5.4.1. Характеристики адсорбции

Ионная адсорбция является одной из важных характеристик системы почва–вода, взаимодействующей с окружающей средой. Low (1958) сообщает о природе воды, адсорбированной на глинах, в связи с электрохимическими свойствами

обменных ионов. Часть экспериментальных результатов суммирована в таблице 6.4.

Таблица 6.3. Природа воды, адсорбированной на глинах, в связи с электрохимическими свойствами обменных ионов

Типы глины ^a	Ионная подвижность при 25°C (см ² /В/с)	Энергия ионной активации (кал/г иона)	Ионная диссоциация (относительная)	Плотность адсорбированной воды при 25°C (г/см ³)	Структурное развитие воды (относительное)
К-глина	0,000051	4037	++	0,981 ^b	+
Na-глина	0,000069	4486	+++	0,972	+++
Li-глина	0,000057	4358	++	0,975	++
Na-глина	0,000132	5157	++++	–	–

^a Первые три глины были получены из колоночного бентонита Вайоминга < 2,0 мкм путем титрования. Последняя глина была приготовлена из < 0,2 мкм электродиализированного бентонита Вайоминга путем титрования.

^b Эти значения для расстояния 10 Å от поверхности глины.

Источник: по Low, P. F. (1958), Movement and Equilibrium of Water in Soil Systems as Affected by Soil-Water Forces, HRB Special Report 40, pp. 55–64.

Таблица 6.4. Идентификация некоторых проблемных почвенных отложений на основе почвенных констант

Почвенные константы		Поведение почвы
Оба значения FME и CME	> 30	Обширные почвы
Если значение FME	> CME	
Значения как FME, так и CME	> 30	Опасность автогенного разжижения
Если FME	> LL	
Если LI	≤ 0,4	Сверхконсолидированной глины

Примечание: CME – центробежный эквивалент влажности почвы (ASTM D425); FME – полевой влажностный эквивалент почв (ASTM D426); LL – верхний предел пластичности (ASTM D423); LI – индекс пластичности.

LI = (содержание воды ± предел пластичности) / индекс пластичности

PL – предел пластичности грунта (ASTM D424); PI (индекс пластичности) = LL – PL.

6.5.4.2. Полимерная адсорбция

В процессе проникновения загрязнений некоторые меньшие органические молекулы могут быть введены между слоями глинистых минералов из-за неправильной формы полимеров. Согласно Velde (1992), явление адсорбции полимера также следует принципу двойного электрического слоя, как обсуждалось в разделе 4.9. Нелокализованный отрицательный заряд на глинистой структуре немедленно компенсируется в ближайшей к ней зоне положительными ионами в водном растворе. Полимерные эффекты ионного взаимодействия с заряженными глинистыми частицами в водной суспензии указывают на то, что увеличение концентрации элементов в растворе приводит к флокуляции

глинистых частиц. Взаимодействие адсорбции глины и полимера аналогично абсорбции глины и органики. Однако диапазон типов глины больше из-за того, что свойство набухания больше не является необходимым.

Адсорбционные характеристики из паровой фазы обсуждались в разделе 5.13. Указано, что сухие глинистые минералы устанавливают различные равновесия при контакте с водным веществом в газе или в жидкой фазе. Результаты адсорбции из паровой фазы для четырех природных почв показаны на рисунке 5.20.

6.5.4.3. Адсорбция опасных веществ

Адсорбционные характеристики опасных или токсичных веществ представлены на рисунке 6.11. Обнаружено, что увеличение pH или уменьшение размера частиц будет увеличивать процент адсорбции для фенола и кадмия.

Адсорбированный пентахлорфенол (PCP) включен в список опасных веществ в природных почвах. PCP в качестве опасного вещества использовался в больших количествах в качестве биоцида, сохраняющего древесину, в течение не менее 50 лет. Обработанную PCP древесину обычно можно найти на свалках в виде старых опорных столбов, железнодорожных шпал и деревянных ящиков. Фильтрат с этих свалок затем содержит PCP. Адсорбция PCP почвой зависит от химических и физических свойств почвы, химических веществ, присутствующих в водной фазе, и стремления молекул PCP к поверхности. Согласно исследованиям Christodoulatos и соавторов, свойства почвы, которые влияют на степень адсорбции, включают гранулометрический состав, содержание органического углерода, минералогию глины и кислотность в почве, отражаемую pH. (1994). Различные типы пород также имеют характеристики адсорбционного поведения. Адсорбция некоторых осадочных пород с содержанием урана (U) представлена в таблице 10.7. Поведение пыли и взвеси также тесно связано с характеристиками адсорбции. Благодаря адсорбции пыль является ключом ко всем проблемам загрязнения воздуха, как обсуждалось в разделе 3.9.

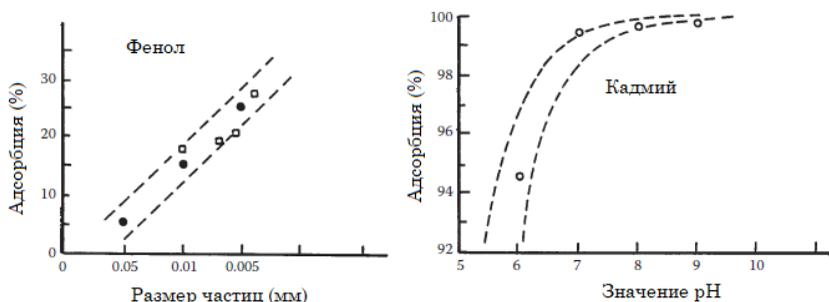


Рисунок 6.11. Адсорбционные характеристики опасных или токсичных веществ (данные из: Wang, С. Н. [1985], Water Pollution, Scientific Publishing, Beijing; и другие).

6.5.4.4. Адсорбционные и стабилизирующие материалы

При улучшении грунта или его стабилизации адсорбция ионов напрямую связана с прочностью стабилизированных материалов. Некоторые относительно

важные стабилизирующие материалы, такие как цемент, битум и известь, рассмотрены далее.

1. *Почва-цемент.* При обращении к химии поверхности и к химии стабилизации почвы и цемента становится ясно, что на этот процесс влияют определенные физические факторы, такие как распределение размера зерен, поровое пространство и взаимосвязь влажности и плотности. Грубый эффект от них, по-видимому, является модификацией результатов, ожидаемых от электрохимического подхода (раздел 5.6), и его значение возрастает по мере увеличения активности глинистого материала, в результате чего достигается оптимальное значение активности для наиболее эффективной стабилизации. Некоторые соли (например, сульфаты натрия и магния) являются вредными вследствие взаимодействия с цементом с образованием расширяющихся соединений, что приводит к разрушению смеси. Большая работа была проделана при исследовании почвенно-цементной стабилизации HRB (1943).

2. *Стабилизация битума.* Важными факторами, контролирующими стабилизацию битума, являются (1) ионообменная емкость, (2) соотношение кремнезема и полуторной окиси и (3) адсорбционные свойства битума и материалов, выбранных для стабилизации. Необходимое количество битума зависит в основном от стремления битума к почвенному материалу. Поскольку битум преимущественно действует как электромагнитно заряженный коллоид, количество требуемого битума увеличивается с увеличением количества электроотрицательных зарядов, расположенных на поверхности стабилизируемого материала. В случае глинистого грунта процентное содержание требуемого битума увеличивается с активностью глинистого материала, о чем писал Woollorton (1955).

3. *Хлорид, известь и силикат.* Для стабилизации можно использовать разные электролиты. Наиболее важные из них (хлорид кальция, хлорид натрия, гидратная известь, хлорид железа и силикат натрия) могут иметь важное значение благодаря электрохимическим концепциям, связанным с ионным обменом, хотя другие могут характеризоваться изменением гигроскопичности, понижением точки замерзания, возможностью увеличения максимальной плотности и сопротивлением сдвигу, а также замедления испарения путем кристаллизации внутри капилляров.

В дополнение к своим растекающимся свойствам хлорид кальция может путем выщелачивания превращать глину с высокой влагоудерживающей способностью, например натриевую глину, в кальциевую глину посредством ионообменной реакции, тем самым снижая индекс пластичности и вызывая изменение объема. Преимущество, получаемое в результате этого процесса, растет с увеличением соотношения кремнезема и полуторной окиси. Гидратированная известь может вести себя аналогично с дополнительным преимуществом в качестве смачивающего агента для изменения эффективного признака высокоактивных глинистых коллоидов. При наличии природных пуццолановых материалов также наблюдается адсорбционный эффект.

Влияние силиката натрия в почвах заключается в увеличении водостойкой агрегации, сопротивлении дроблению и уменьшении пластического предела,

индекса пластичности и набухания. Этот процесс, по-видимому, связан с анионным обменом (Wooltorton, 1955), что приводит к образованию нерастворимых силикатных оболочек вокруг частиц почвы и сопровождается эффектами адсорбции.

6.6. ЯВЛЕНИЕ РАСТРЕСКИВАНИЯ И ЕГО МЕХАНИЗМЫ

6.6.1. Явление растрескивания почвы

6.6.1.1. Общее обсуждение

Растрескивание почвы является естественным процессом и часто наблюдается во многих естественных и искусственных земляных сооружениях. Трещины становятся результатом внутреннего энергетического дисбаланса в массе почвы, вызванного неравномерным распределением влаги, температурным распределением или распределением энергии уплотнения во время строительства. Трещины в пойменных глинах возникают в результате разложения с последующим циклическим расширением и сокращением в результате сезонного увлажнения и высыхания. Многие предварительно уплотненные глины также имеют трещины из-за разгрузки или десикации. Близко расположенные небольшие трещины способствуют прогрессирующей эрозии или оползням при выемке грунта, создании откосов, плотин и насыпей для шоссе на берегах рек, гидравлических барьеров и других земляных сооружений.

6.6.1.2. Типы растрескивания почвы

Механизмы растрескивания почвы, изученные Fang и соавторами (1989а, 1994а), были разделены на четыре типа, а именно: усадочные, термические, растягивающие и конусные разрушения. Обсуждение этих четырех типов трещин приведено ниже.

6.6.1.2.1. Усадочное растрескивание

Это наиболее распространенное растрескивание, обнаруженное в земляных конструкциях. Данное явление, показанное на рисунке 6.12, можно наблюдать на высыхающих грязевых участках. Поскольку вода уходит с поверхности грунтовой массы, в поверхностном слое высыхания возникают силы растяжения. Из-за потери воды почва также теряет способность ослаблять эти растягивающие усилия посредством пластического потока. Эти напряжения в конечном итоге снимаются образованием усадочных трещин, которые разбивают поверхностный слой на куски более или менее четко выраженных геометрических форм. Эта геометрическая форма трещин зависит от глинистого минерального состава, процесса нагрева, поровых флюидов и других факторов. Как показано на рисунке 6.12, иллит демонстрирует более мелкие трещины, чем мусковит, а высушенные в печи образцы дают более неправильные рисунки трещин, чем образцы, высушенные на воздухе.

Если почвенный материал является однородным, картина растрескивания будет шестиугольной в соответствии с законом тройного угла, который является особой формой закона наименьшей энергии. Это явление также можно объяснить

концепциями линейной механики разрушения, которые будут обсуждаться в следующем разделе. Если почвенная система неоднородна, то шестиугольники будут иметь тенденцию округляться, а органическое вещество будет концентрироваться на поверхности трещин. Неоднородность почвы обусловлена наличием органического вещества, разным стремлением к воде и неоднородной жесткостью.

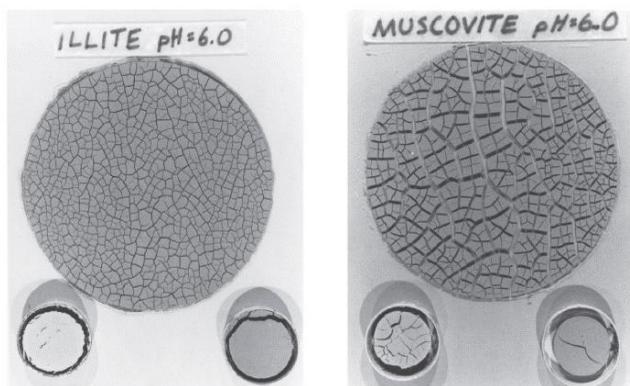


Рисунок 6.12. Сравнение видов растрескивания иллитовой и мусковитовой глин.

6.6.1.2.2. Термическое растрескивание

Термические трещины вызваны изменением тепловых напряжений в материале. Напряжения возникают, когда материал нагревается, а затем внезапно охлаждается при резких перепадах температуры (процесс замораживания–оттаивания). Термические трещины в почве несколько отличаются от других строительных материалов, потому что температура и влажность в почвенной массе весьма тесно связаны. Стрессовое состояние почвы также чувствительно к воздействию как температуры, так и влажности одновременно.

Пластическая деформация происходит в разных зонах грунтовой массы в результате перепада температур, которое сопровождается изменениями объема, возникающими в течение цикла охлаждения. Если возникающие деформации находятся в пределах диапазона упругой прочности грунтовой массы, то после достижения температурного равновесия напряжение не сохраняется. Как показано на рисунке 6.12, схемы растрескивания образцов иллита и мусковита, высушенных в печи и на воздухе, различны, поскольку скорость нагрева в печи более интенсивная и менее равномерная, чем в процессе сушки на воздухе. Другими факторами, способствующими появлению термических трещин, являются типы почвы, удельный вес, гранулометрический состав, коэффициент пустотности и геометрия первичной и вторичной поверхностей сушки.

6.6.1.2.3. Растяжение трещин

Растяжение трещин вызвано главным образом нагрузкой на вскрышные породы, включая нагрузку на конструкцию, осадки, ледовые и снежные нагрузки, растительность и сезонные нагрузки ползучести. Иногда они еще связаны с изменениями влажности или теплового напряжения, как обсуждалось ранее, а

также с нагрузками разрушения, которые будут обсуждаться в следующем разделе.

6.6.1.2.4. Трещиностойкость

В почвенной массе, как природной, так и созданной человеком, всегда существуют некоторые трещины, вызванные ежедневными изменениями влажности или температуры или сезонными колебаниями уровня грунтовых вод, дождями или таянием снега – при этом трещины или пустоты заполняются водой, которая вызывает внутреннее давление. Это давление поровой воды меняется в зависимости от изменений условий окружающей среды, а также капиллярного напряжения, возникающего из-за поровой воды между частицами почвы. Когда насыщенная почва высыхает, в каждой структурной пустоте почвы развивается мениск, который создает натяжение в почвенно-водной системе и соответствующую силу сжатия в скелете почвы. Это напряжение сжатия столь же эффективно, как и внешняя нагрузка – напряжение, обычно используемое в механике грунта при создании сжатия. Давление 200–300 кПа может быть получено в мелкозернистых почвах. Эта внутренняя нагрузка циклического типа, вызванная сочетанием усадки или тепловых напряжений и колебаний давления в поровой воде между частицами почвы, называется нагрузкой разрушения в почве. Трещины, вызванные нагрузкой разрушения, называются трещинами разрушения в почве.

6.6.2. Механизмы растрескивания

6.6.2.1. Взаимосвязь трещин и разрушения

Для данного материала характеристики растрескивания и разрушения принадлежат одной системе. Растрескивание представляет собой явление до разрушения материала, а разрушение – это поведение материала в растресканном состоянии, как показано на рисунке 6.2. На рисунке 6.2 отражена взаимосвязь между условиями до разрушения грунта и после него с точки зрения геотехнической инженерии. На ранней стадии деформации в зависимости от нагрузки возникают трещины из-за различных естественных или техногенных причин, как говорилось в предыдущих разделах. На этом этапе поведение почвы контролируется мультимедийными энергиями, такими как тепловая, электрическая и магнитная энергии. Однако на стадии разрушения в почве преобладает только механическая энергия, которая является нагрузкой. Поэтому для оценки срока полезного использования почвы необходимо исследовать механизмы растрескивания и разрушения.

6.6.2.2. Взаимодействие трещин и влаги

Процесс перехода растрескивания в разрушение, как показано на рисунке 6.2, является сложным явлением. Существует множество факторов, влияющих на трещины и на то, как эти трещины взаимодействуют в процессе разрушения. В целом, все трещины связаны с содержанием влаги в почве и местными условиями. Как говорилось в разделе 5.6, условия равновесия в системе почва–вода различаются при контакте с жидкой водой и водяным паром. Даже при одном и том же содержании влаги структура и физико-химические свойства системы почва–вода могут значительно различаться в зависимости от пути потока, из

которого была получена влага. Поскольку механизмы растрескивания грунта во всех случаях связаны с содержанием влаги, направления потока или пути жидкости также связаны со схемами растрескивания. Существуют два основных механизма растрескивания почвы, о чем будет сказано далее.

6.6.2.2.1. Растрескивание, когда почва высыхает

Поскольку влажные или связные системы почвы теряют воду, частицы почвы движутся все ближе и ближе друг к другу. Если высыхание происходит от поверхности вниз, как в грязевой плоскости, высушенный поверхностный слой сжимается. Следовательно, профиль почвы состоит из верхнего слоя, который испытывает уменьшение объема из-за высыхания, и нижнего слоя, который стабилен. Растягивающие напряжения затем развиваются в верхнем слое. Кроме того, напряжения сдвига также развиваются между верхним и нижним уровнями. Этот шаблон растрескивания обеспечивает наибольшее снятие напряжения при минимальном объеме работы. Другими словами, растрескивание и разрушение во время процесса высыхания контролируются в основном за счет тепловой энергии.

6.6.2.2.2. Растрескивание, когда почва насыщена

Попадание воды в пористую сухую почвенную систему также может привести к растрескиванию почвы. В таком случае эти причины и явления являются более сложными, чем в условиях высушивания, поскольку они управляются энергетическими полями нескольких сред, которые включают в себя тепловые, электрические и магнитные энергии, как описано в разделе 5.6. Набухаемость увеличивается, когда почва становится насыщенной. Эта способность глинистых минералов может привести к внутреннему набуханию, которое уменьшает проницаемость. Внутренние силы, создаваемые водой, поступающей в почвенную массу, могут быть достаточно большими, чтобы вызвать отслоение систем на поверхности и привести к образованию трещин.

6.6.3. Схема и размеры трещин

6.6.3.1. Процедура измерения структуры трещин (метод Лихая)

Характеристика характера растрескивания является важным явлением при оценке экологических геотехнических свойств почвенно-водной системы. Простая процедура подготовки образцов, подлежащих исследованию с помощью теста на растрескивание, разработанного в Университете Лихая, описана далее.

6.6.3.1.1. Подготовка образца почвы

1. Все образцы почвы должны проходить через стандартное сито № 40. Меньшие размеры частиц или большая площадь поверхности на единицу объема образца почвы даст более четкие схемы растрескивания.

2. Требуется от 50 до 100 г почвы. Точное количество почвы, которая будет использоваться, не является критическим фактором.

3. Содержание воды в образце должно быть в состоянии полного насыщения. Для простоты можно использовать содержание воды в верхнем пределе пластичности (ASTM D423–66).

4. Почва с водой должна тщательно перемешиваться не менее 5 минут. Затем равномерно распределите эту влажную почвенную пасту на чистой стеклянной

пластине, как показано на рисунке 6.13, формируя образец круглой формы – грязевую подушку (рисунок 6.13а.)

5. Максимальная высота влажного грунта-пасты должна быть не более 1/20 дюйма, как показано на рисунке 6.13б. Чем тоньше влажная грязевая подушка, тем будут развиваться более отчетливые трещины.

6. Процесс сушки для образца почвы может быть определен тремя распространенными методами, используемыми в лаборатории: воздушная сушка при комнатной температуре (20°C или 68°F) в течение 24 часов, сушка в сушильном шкафу при 110°C в течение 6 часов или в микроволновой печи в течение 3–4 минут.

Следует отметить, что при использовании любого из трех методов сушки для определения содержания влаги в образце почвы результаты будут очень близкими или практически одинаковыми. Однако схема растрескивания для одной и той же почвы с использованием этих трех различных методов будет отличаться.

6.6.3.1.2. Элементы, подлежащие проверке с использованием теста на растрескивание

1. Геометрия структуры трещин, раскрытия трещин, длины и формы.
2. Оценка процента усадки по сравнению с исходным (влажным состоянием) образцом почвы.
3. Описание цвета почвы после высыхания.
4. Изменения структуры, вызванные процессами нагрева, такими как воздушная сушка и сушка в печи.
5. Изменения структуры, вызванные различными жидкостями пор.
6. Изменения рисунка из-за типов глинистых минералов.
7. Изменения цвета почвы, вызванные различными поровыми жидкостями в пустотах почвы. (Физико-химическое или биологическое взаимодействие между частицами почвы и поровыми жидкостями может быть объяснено явлениями взаимодействия почвы и воды.)

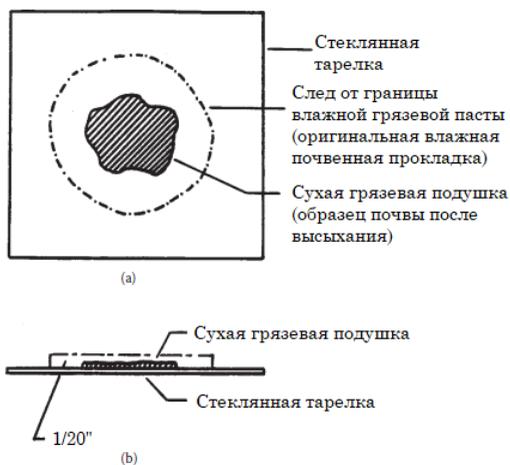


Рисунок 6.13. Подготовка влажной грязевой подушки для проведения испытаний на растрескивание: (а) вид сверху сухой грязевой подушки, (б) поперечное сечение сухой грязевой подушки.

Результат испытания на растрескивание почвы является качественным индикаторным свойством, которое должно коррелировать с другими характеристиками почвы, чтобы иметь существенное значение. Эти эксплуатационные испытания включают: (1) испытание на растяжение, (2) испытание на разрушение, (3) анализ структуры глинистого минерала и (4) анализ химического состава поровой жидкости.

6.6.3.2. Измерение внутреннего растрескивания почвы

В предыдущем разделе мы обсуждали явления растрескивания поверхности почвы и их измерение. Однако во многих случаях (глиняная прокладка, гидравлические барьеры и другие земляные конструкции) у почв также развивается внутреннее растрескивание из-за усадки, термического воздействия, растяжения и разрушения. Характеристики внутреннего растрескивания также важны для долговременного исследования производительности.

Измерение внутреннего растрескивания почвы может быть выполнено с использованием методов компьютерной томографии (СТ). Техника СТ является относительно новым рентгеновским методом неразрушающего контроля (NDT), который преодолевает некоторые из этих ограничений, как сообщают Armistead и Stanley (1989). СТ измеряет значения плотности по точкам в тонких поперечных сечениях объекта, таким образом позволяя видеть трехмерное изображение внутренней структуры при сравнении последовательных поперечных сечений. В рентгеновской компьютерной томографии коллимированный рентгеновский луч, проходящий через тестовый объект, измеряется массивом детекторов, расположенных на другой стороне объекта. Объект слегка поворачивается или в некоторых случаях перемещается и поворачивается, и выполняется новый набор измерений. Этот процесс повторяется до тех пор, пока объект не будет полностью повернут. Измеренные проекции контролируются компьютером, что является основным преимуществом этого метода по сравнению с обычной рентгенографией.

Внутреннее растрескивание образца глинистого вкладыша (смесь песка и бентонита), полученного в лаборатории, вызвано испытанием на трехосное сжатие. Эти трещины не видны на внешней поверхности образца после испытания на трехосное сжатие в условиях разрушения. Тем не менее при рентгеновском СТ-тестировании наблюдаются внутренние трещины, как показано на рисунке 6.14. Образец был подготовлен в Университете Лихай и проверен ведущей исследовательской корпорацией в Калифорнии.

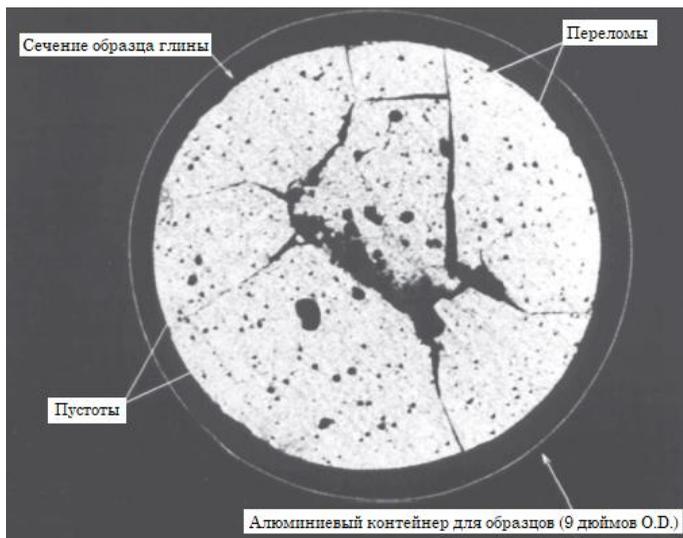


Рисунок 6.14. Структура внутреннего растрескивания, снятая рентгеновским СТ-методом.

6.6.3.3. Процесс растрескивания загрязненных почв

Схемы и механизмы растрескивания загрязненной и незагрязненной почвы отличаются. Используя для сравнения воду (незагрязненную) и кислоту или основание (загрязненное), можно наблюдать закономерности растрескивания почвы, вызванные некоторыми загрязненными водами из-за различий диэлектрических постоянных и их поверхностного натяжения в жидкостях пор. Характеристики этих двух важных факторов обсуждаются в разделах 5.3 и 9.7. Типичные схемы растрескивания с различными поровыми жидкостями показаны на рисунке 6.15.

6.6.3.4. Структуры почвы, относящиеся к шаблонам трещин

Законы, регулирующие образование усадочных трещин, подробно обсуждали Haines (1923) и Thompson (1942). Влияние на трещины в почве циклов замораживания–оттаивания и высушивания–смачивания было изучено Cheratzki и Frese (1958). Флокуляция или дисперсия также будут влиять на схему растрескивания, как показано на рисунке 6.15. Andrews и соавторы (1967), Alther и соавторы (1985) и Evans (1991) указали, что флокулирующие и дисперсионные структуры и поровые флюиды создают различные типы структур растрескивания. Как показано на рисунке 6.16, флокуляция приводит к образованию трещин большего размера, чем дисперсионные структуры.

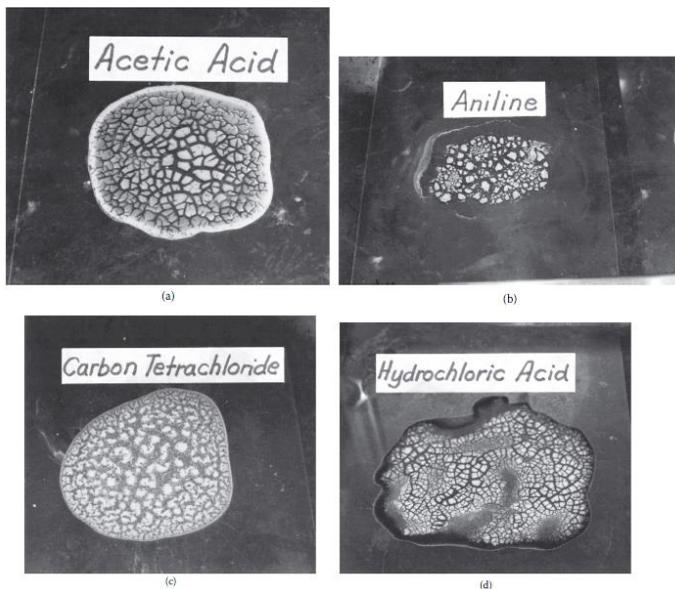


Рисунок 6.15. Образцы трещин с различными порами.

6.7. РАСТИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЧВЫ

6.7.1. Введение

Для количественного измерения растрескивания грунта, как описано в разделе 6.4, одним из самых простых подходов является определение прочности на растяжение. Существует множество методик испытаний для измерения прочности грунта на растяжение, в том числе модель Брикса, тест типа пучка, тест на разрыв при растяжении, тест на проникновение без ограничений, тип с трехосными ячейками и устройство с полым цилиндром. Обзор и оценка этих методов и интерпретации данных приведены в ASTM (Yong и Townsend, 1981).

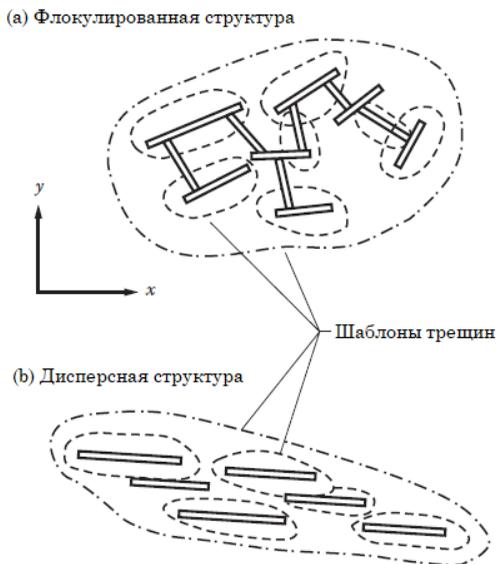


Рисунок 6.16. Схема иллюстрирует влияние структуры почвы на растрескивание.

Тест, описанный в этой главе, является испытанием на неограниченное проникновение (UP-тест), разработанным в Университете Лихай в начале 1970 года (Fang и Chen, 1971). Испытание UP является самым простым и наименее дорогим методом измерения прочности на не прямое растяжение грунтов или других неметаллических строительных материалов. Результаты испытаний сравнивались с обычным испытанием на разрыв при растяжении (ASTM C496; AASHTO T198) и показали хорошее сходство. UP-тестирование имеет преимущество в том, что его удобно проводить в сочетании с обычными испытаниями на уплотнение и CBR.

Для теста UP можно использовать образцы разных размеров и форм. Кроме того, другие доступные методы испытаний измеряют предел прочности на разрыв в заранее определенной плоскости разрушения, в то время как тест UP всегда вызывает разрушение на самой слабой плоскости, что приводит к измерению истинной прочности на растяжение грунта.

6.7.2. Механизм прочности на растяжение почвы

1. Когда почва сухая, она удерживается цементирующими веществами и клейкими пленками между частицами почвы. Сила цементирования этих пленок зависит от их собственных физико-химических свойств.

2. Сила сцепления между частицами почвы также зависит от размера зерна и площади его поверхности.

3. Если почва постепенно становится влажной, прочность на растяжение развивается из-за поверхностного натяжения и других сил.

4. С физико-химической точки зрения предел прочности на растяжение для частично насыщенного грунта обусловлен диполями, связывающими положительный заряд на одной частице с отрицательным на соседней частице. По мере того как толщина диффузного двойного слоя увеличивается и концентрация

электролита уменьшается, степень флокуляции также уменьшается, что обеспечивает более упорядоченное расположение частиц.

5. Если происходит дальнейшее увеличение содержания влаги, которое снижает концентрацию частиц почвы на контакт и уменьшает чистые силы притяжения между частицами, то, поскольку почва насыщена, существует очень низкая прочность на разрыв без какой-либо технической значимости; следовательно, прочность на разрыв создает в основном частично насыщенный грунт.

6. Когда почва сухая, она удерживается не только прочностью на растяжение, но и силами сцепления и трения. Следует отметить, что предел прочности на растяжение более чувствителен к содержанию влаги, чем другие параметры прочности, как описано в разделе 5.12. В таблице 6.5 даны обобщения касательно механизма прочности на растяжение почвы.

Таблица 6.5. Механизм прочности на растяжение почвы на разных стадиях.

Сухая почва	Контролируется сцеплением, трением и некоторым напряжением	
Частично насыщенная почва	В основном контролируется пределом прочности	Вызвано: <ul style="list-style-type: none"> • поверхностным натяжением почвенной влаги; • ориентированными диполями, связывающими положительный заряд на одной частице с отрицательным на соседних частицах; • формированием электрического поля ионами; • диффузной двухслойной толщиной, которая увеличивается; • более упорядоченным расположением частиц; • концентрацией электролита, которая уменьшается.
Насыщенная почва	Прочность на растяжение очень мала	

6.7.3. Измерение прочности на растяжение почвы

Метод Лихая также называется методом неограниченного проникновения (UP). Лабораторная установка для UP-теста показана на рисунке 6.17. При использовании двух стальных дисков (штампов), центрированных как на верхней, так и на нижней поверхностях цилиндрического образца почвы, на диски прикладывается вертикальная нагрузка, пока образец не достигнет разрушения. Выравнивание образца для испытаний между двумя дисками должно быть по одной линии. Предел прочности образца на разрыв можно рассчитать по максимальной нагрузке по формуле:

$$\sigma_t = \frac{P}{(KbH - a^2)} \quad (6.1)$$

где σ_t – предел прочности, фунт/дюйм²; P – максимальная нагрузка при разрушении, фунт; K – постоянная, в зависимости от размера решета и типа почвы (таблица 6.6); b – радиус образца, в дюймах; H = высота образца, в дюймах; a – радиус диска (решета), в дюймах.

В уравнении 6.1 постоянная K зависит от диска и размера образца, а также от отношения прочности на сжатие к растяжению. Таблица 6.6 суммирует предложенные значения K для различных типов почвы и размеров решета.

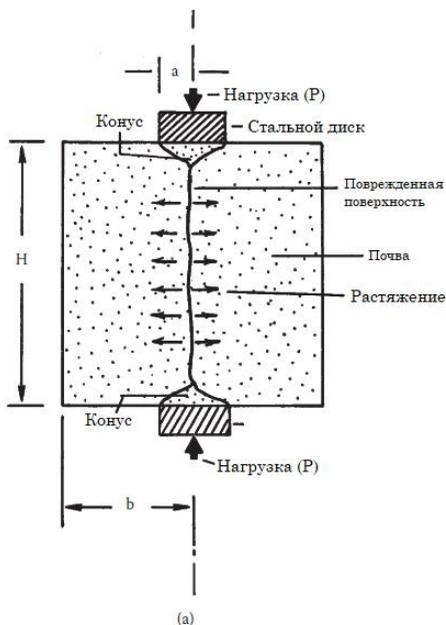
6.7.4. Прочность на растяжение, связанная с другими константами почвы

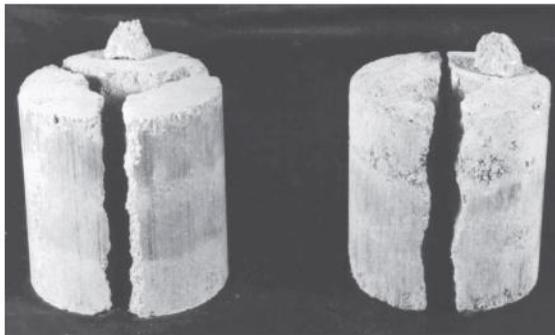
6.7.4.1. Пределы и плотность Аттерберга

Прочность на растяжение увеличивается с увеличением верхнего предела пластичности (LL) и индекса пластичности (PI). При более высоком содержании влаги при увеличении плотности прочность на растяжение увеличивается незначительно, однако при более низком содержании влаги при увеличении плотности прочность на разрыв резко возрастает. Аналогичные выводы были сделаны другими исследователями с использованием тестов на разделенное напряжение (Narain и Rawat, 1970).

6.7.4.2. Индекс активности и выносливости

Значения прочности на разрыв и активности (A) приведены на рисунке 6.18a. Четко указано, что прочность на растяжение значительно возрастает для всех типов грунтов при сушке на воздухе. Тем не менее количество и скорость увеличения прочности зависят от типа почвы. Для почвы с низкой пластичностью различия между двумя условиями влажности более выражены, чем для почвы с высокой пластичностью. На рисунке 6.18b показаны результаты испытаний прочности на растяжение в зависимости от показателя вязкости (I_f) для обоих условий влажности. Аналогичные тенденции указаны на рисунке 6.18 (a и b). Исходя из этих результатов, можно прогнозировать, что будут существовать большие различия в прочности между двумя условиями влажности для грунта с низкой пластичностью и грунта с высокой пластичностью.





(с)

Рисунок 6.17. Испытание на неограниченное проникновение (UP) для определения прочности грунта при растяжении: (а) геометрический образец; (б) испытательная установка; (с) режим разрушения образцов почвы.

Таблица 6.6. Значение для константы K , размеры образца-решета, соотношение высоты и диаметра образца и скорости загрузки.

Размер образца	K-значение	
	Почва	Стабилизированные материалы
4 × 4,6 дюйма (10,2 × 11,43 см)	1,0	1,2
6 × 7 дюймов (15,24 × 17,78 см)	0,8	1,0
Более 12 дюймов (0,30 м)	0,8	
Размер образца-решета: 0,2–0,3		
Отношение высоты к диаметру образца: 0,8–1,2		
Скорость нагружения. Рекомендация ASTM: для осевой деформации в соотношении 0,5–2 % высоты в минуту.		

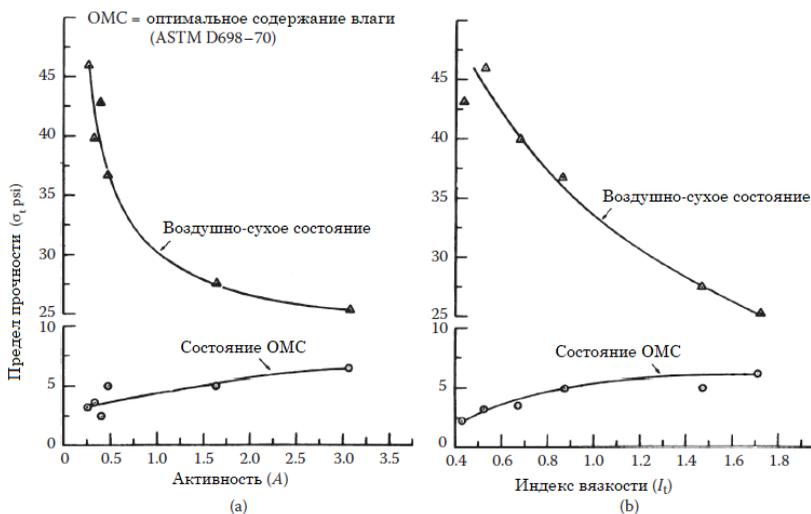


Рисунок 6.18. Прочность на растяжение в зависимости от констант двух влагосодержаний во время испытаний на растяжение: (а) прочность на растяжение в зависимости от

активности (A); (b) прочность на растяжение в зависимости от вязкости (I_v). (По Fang and Fernandez [1981], ASTM STP 740, pp. 130–144.)

6.7.4.3. Прочность при сжатии

Отношение неограниченной прочности при сжатии к пределу прочности материалов представляет интерес для всех инженеров-конструкторов из-за возможности его практического применения. Для почв большинство испытаний для этого соотношения проводятся в условиях ОМС. Криволинейные отношения были описаны для различных типов почв (Narain и Rawat, 1970; Krishnaуа и соавторы, 1974). На рисунке 6.19 показано влияние типов почвы и содержания влаги в пресс-форме на коэффициент сжатия–растяжения. При изучении показаний, приведенных на рисунке 6.19, для грунта с низкой пластичностью выяснилось, что содержание влаги в пресс-форме чувствительно к соотношению сжатие–растяжение. Для высокопластичных же грунтов содержание влаги в пресс-форме намного менее чувствительно к отношению сжатие–растяжение.

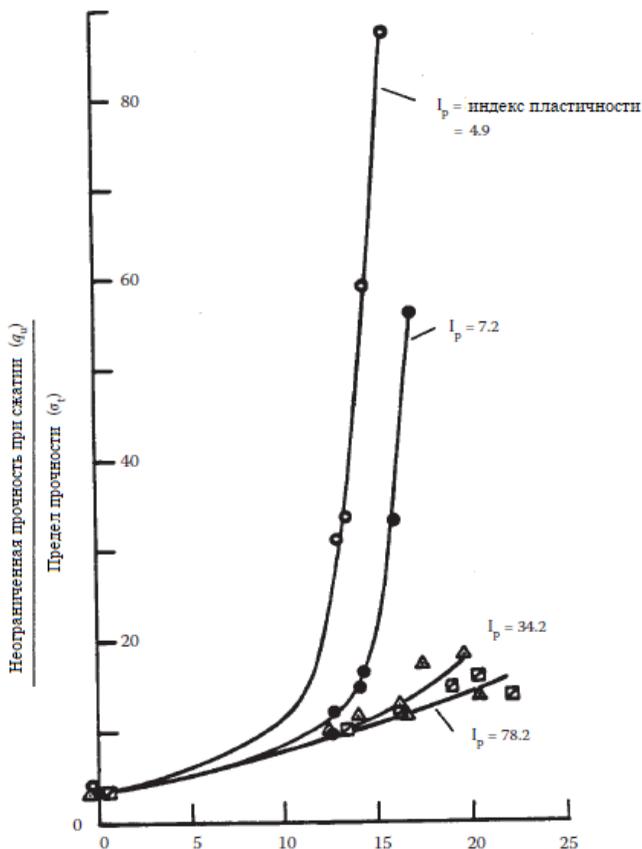


Рисунок 6.19. Влияние типов почвы и содержания влаги в пресс-формах на коэффициент сжатия–растяжения (данные взяты из: Fang and Fernandez [1981], ASTM STP 740, pp. 130–144).

6.7.4.4. Угол сцепления и трения

Связь между сцеплением и прочностью на разрыв также полезна для специалистов-практиков. Когда почва сухая, соотношение связности грунта и прочности на разрыв влияет только на типы почвы. Для грунтов с низкой пластичностью небольшое увеличение содержания влаги в пресс-форме резко влияет на отношение связности грунта – растяжения, в то время как для грунта с высокой пластичностью отношение грунт–влага оказывает меньшее влияние на соотношение сцепление–растяжение.

Криволинейная зависимость между углом трения и пределом прочности наблюдалась для всех шести типов грунтов. Это указывает на то, что грунты с более высокими показателями пластичности имеют меньшие углы трения. Также можно видеть, что при более низких значениях прочности на разрыв скорость увеличения угла трения намного выше, чем при более высоких значениях прочности на разрыв.

6.7.4.5. Эффект обменных ионов

На рисунке 6.20 (а и b) показаны прочность при сжатии и растяжении образцов девяти ионных модификаций двух природных глинистых почв. На рисунке 6.20а показана зависимость прочности на разрыв от PI для почв хейгерстаун и сесил. Прочность на растяжение испытывали в условиях воздушной сушки. Данные, представленные на рисунке 6.20а, указывает на то, что для почвы хейгерстаун существуют большие различия по сравнению с почвой сесил. Аналогичный вывод можно получить для отношения прочности при сжатии к растяжению, как показано на рисунке 6.20b.

6.7.4.6. Классификация почвы на основе прочности на растяжение

Как обсуждалось в разделе 5.12, прочность на растяжение более чувствительна к условиям окружающей среды, чем результаты испытаний на сжатие; следовательно, выгодно использовать предел прочности на растяжение для классификации типа почвы, для стабилизации почвы или укрепления грунта в неблагоприятных средах. В таблице 6.7 представлена система классификации грунтов на основе прочности на растяжение, определенной с помощью UP-испытаний.

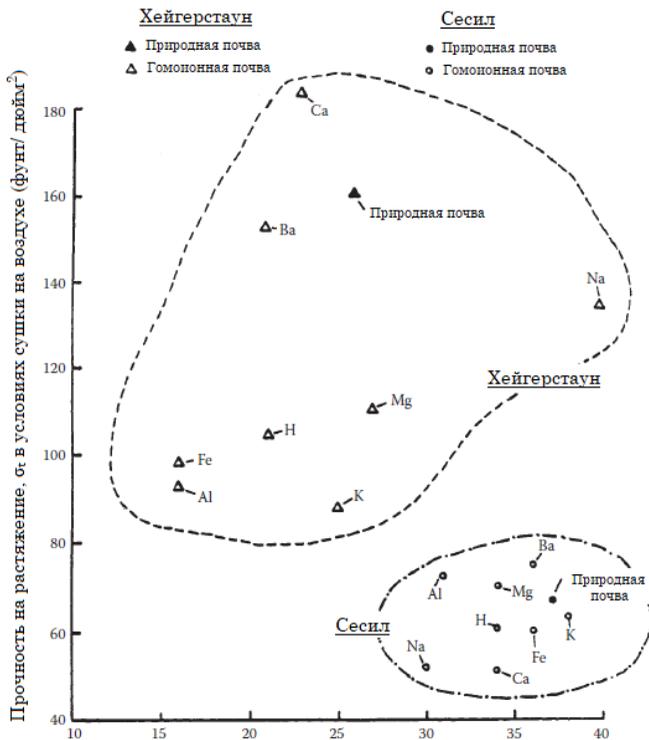


Рисунок 6.20а. Прочность на сжатие–растяжение в зависимости от показателя пластичности на высушенных на воздухе образцах природных и гомоионных почв: прочность на растяжение в зависимости от показателя пластичности (данные взяты из: Winterkorn, H. F. and Moorman, R. B. B. [1941], Proc. 21st Annual Meeting, HRB, pp. 415–434).

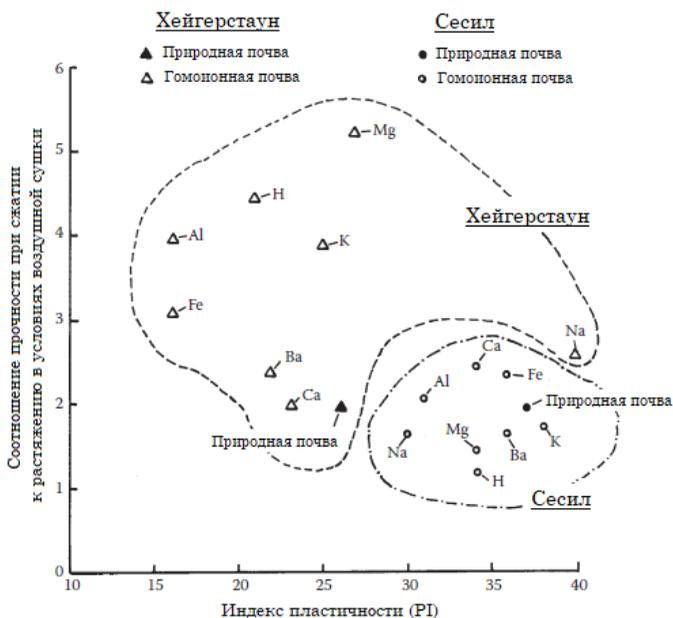


Рисунок 6.20б. Прочность на сжатие–растяжение в зависимости от показателя пластичности на высушенных на воздухе образцах природных и гомоионных почв: отношение прочности на сжатие–растяжение к индексу пластичности (данные взяты из: Winterkorn, H. F. and Moorman, R. B. B. [1941], Proc. 21st Annual Meeting, HRB, pp. 415–434).

Таблица 6.7. Прочность на растяжение для классификации нерудных строительных материалов

Степень ломкости	Диапазоны прочности на растяжение [psi (кПа)]	Типичные виды материалов ¹
Слабые	0–10 (0–69)	Насыщенная почва, песчано-иловый песок, шлаки, сухая летучая зола
Очень рыхлые	10–30 (69–210)	Уплотненная почва, жесткая натуральная глина, конгломерат гравия
Рассыпчатые	30–80 (210–550)	Почва-цемент; смеси летучей золы и извести, известково-стабилизированный грунт, уплотненные почвы агрегаты
Средне рыхлые	80–300 (550–2100)	Цементные или битумно-обработанные гранулированные материалы, смесь заполнитель – известь – вулканический туф, химически обработанные основные материалы
Сильные	300–1000 (2100–6900)	Легкий бетон, сухой бетон, битумный бетон
Очень прочные	1000 (> 6900)	Камни, высокопрочный бетон, полимербетон

¹ Типичные типы материалов демонстрируют большие различия в результатах из-за содержания влаги в пресс-форме, времени и типов отверждения и взаимодействия грунта и заполнителя.

6.8. ХАРАКТЕРИСТИКА ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ

6.8.1. Введение

Испытание на разрушение также является количественным измерением растрескивания почвы, поскольку для данного материала характеристики растрескивания и разрушения относятся к одной системе. Растрескивание представляет собой явление до разрушения материала, а разрушение – это поведение материала в состоянии разрушения. Чтобы проиллюстрировать эту взаимосвязь, типичная кривая деформации в зависимости от нагрузки для данного грунта представлена на рисунке 6.2. На этом рисунке показана корреляция между предварительными и аварийными состояниями грунта с точки зрения геотехнической инженерии. На ранней стадии кривой деформации в зависимости от нагрузки трещины развиваются из-за различных естественных или техногенных причин. На этом этапе поведение почвы контролируется такими энергиями, как тепловая, электрическая и магнитная. Однако при разрушении в ней преобладает только механическая энергия, которая является нагрузкой. Поэтому для оценки срока полезного использования почвы необходимо исследовать механизмы растрескивания и разрушения и их взаимосвязь.

6.8.2. Применение линейной механики упругого разрушения (LEFM)

Концепцию теории механики разрушения в 1921 году разработал Griffith. Он добился значительных успехов в прогнозировании разрушений, вызванных распространением трещин в металлах. Совсем недавно названная концепция была применена для прогнозирования поведения разрушения горных пород, бетона, дорожных покрытий, стабилизированных строительных материалов и для уплотненных мелкозернистых почв.

Строго говоря, теория ограничивается линейно-упругими материалами, несмотря на тот факт, что пластические или нелинейные деформации неизбежно преобладают в непосредственной близости от дефектов или трещин. Тем не менее она обеспечивает идеальный и простой способ оценки количества энергии, необходимой для создания свободной поверхности в материале. Степень простоты достигается путем сосредоточения внимания на переднем крае трещины, где существуют нелинейные деформации, но они рассматриваются как локализованные в пределах зоны пренебрежимо малых размеров. Хотя напряжения и деформации в этой зоне не могут быть проанализированы в мельчайших деталях, теория LEFM способна дать адекватное описание общей характеристики напряжений и деформаций вблизи трещин. В частности, можно рассчитать скорость высвобождения энергии деформации (G), которая в формальном смысле является силой, управляющей процессом разрушения (Irwin, 1968). В настоящее время пластические и нелинейные деформации могут быть включены в поле зрения механики разрушения только очень ограничено (Shi и Liebowitz, 1968).

Предыдущая работа по механике разрушения была связана главным образом с исследованиями, касающимися ударной вязкости обычных металлов, чтобы охарактеризовать вязкость разрушения материала по критическому значению

энерговыведения, то есть G_c . Таким образом, можно вычислить значения номинального напряжения, необходимого для распространения трещин различных размеров. Многие из этих расчетов были выполнены в прошлом для лабораторных образцов с простыми конфигурациями с учетом изотропности материала, однородности и т. д. Однако применение принципа механики разрушения больше не является простым вопросом при применении к сложной системе, такой как многослойная почва.

6.3. Лабораторные испытания почв на разрушение

6.8.3.1. Подготовка образца для испытаний

Формы, использованные при изготовлении образцов, были разработаны в Геотехнической лаборатории Университета Лихай. Форма состоит из стальной основы со съемными боковыми стенками и внутренними стенками. Она может вместить до четырех образцов одновременно. Размер образца составляет $3 \times 3 \times 0,25$ дюйма, как показано на рисунке 6.21а. Длина выемки составляет 1 дюйм (2,5 см). Эта выемка используется для создания трещин при приложении нагрузки разрыва (P). Внутренняя часть формы была покрыта смазочным веществом для облегчения удаления образцов. После того как образцы были извлечены из формы, они были высушены на воздухе. Над ними была установлена стеклянная крышка для предотвращения коробления.

Размер формы изменяется, когда участвуют более крупные частицы почвы. Размер пропорционален распределению по размеру зерна. Для образцов стабилизированного грунта размером $6 \times 6 \times 0,50$ дюйма использовалась модифицированная форма. Процедура испытания соответствует ASTM (E399-90). Тем не менее простое записывающее устройство, устройство механической деформации, было модифицировано для определения нагрузки разрушения (P).

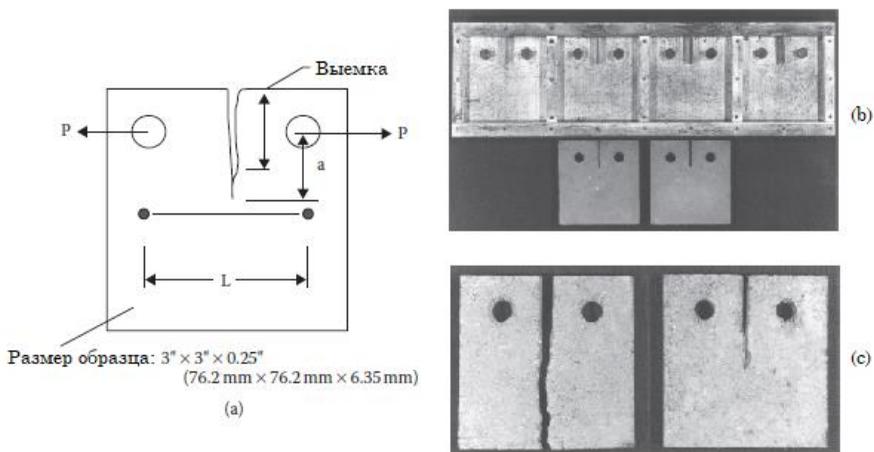


Рисунок 6.21. Определение нагрузки разрушения уплотненных образцов почвы с помощью теста на деформируемость: (а) размеры образца почвы; (б) образец почвы; (с) режим отказа.

6.8.3.2. Измерения и вычисления G_c и K_c

На практике значение скорости высвобождения энергии деформации (G) измеряется в лабораторных испытаниях (ASTM E399-74). В них используется растрескавшийся образец, который разделяется нагрузкой (P), как показано на рисунке 6.21а. Эскиз образца и режима разрушения показан на рисунке 6.21 (а и б). Для калибровочной длины (L) и длины трещины (a) получают скорость выделения энергии деформации (G) для испытуемого материала следующим образом:

$$K_c = Y(a/w) P(a)^{1/2} / Bw \quad (6.2)$$

причем a , B , L и w приведены на рисунке 6.21а. Элемент, обозначенный как $Y(a/w)$, является функцией от a/w , а также поправкой на конечную ширину (Shi и MacDonald, 1974). G_c и K_c связаны, как показано в уравнении 6.2. Связь между нагрузкой разрушения и энергией деформации, разработанная Ирвином (1968), показана в следующем уравнении:

$$G_c = \frac{1}{2} P^2 \frac{\partial(\Delta L/P)}{\partial a} \quad (6.3)$$

где G_c – скорость выделения энергии деформации Гриффита; P – нагрузка разрушения; ΔL = изменение длины колес и a = расстояние между линией приложения нагрузки к вершине трещины.

Элемент $\Delta L/P$ в уравнении 6.3 означает соответствие, а само испытание часто называют испытанием на соответствие. Это позволяет рассчитать коэффициент интенсивности напряжений K вновь созданной поверхности разрушения (трещины) следующим образом:

$$K_c = \frac{G_c E}{1 - \nu^2} \quad (6.4)$$

где K_c = коэффициент интенсивности напряжений; E – модуль Юнга материала; ν – коэффициент Пуассона; G_c определяется из уравнения 6.3.

Уравнение 6.4 является удовлетворительным для образца, толщина которого велика по сравнению с размером трещины (Shi и MacDonald, 1974). Основная идея, лежащая в основе K -фактора, заключается в том, что в нем содержится вся информация, относящаяся к загрузке трещин и геометрии. Коэффициент K меняется от проблемы к проблеме и зависит от напряженного состояния вблизи вершины трещины.

6.8.3.3. Испытания на разрушение под нагрузкой, проведенные на стабилизированных и загрязненных почвах

Было проведено три экспериментальных исследования на: (1) мягкой морской глине, (2) уплотненной мелкозернистой стабилизированной почве и (3) отходах отвержденного ила. Материал, использованный в эксперименте (3), был изготовлен путем смешивания обезвоженного осадка (осадка на фильтре) со шлаком, цементом и водой. Добавленный шлак просеивали (пропуская через сито с размером отверстий 1,25 дюйма и удерживая в сите с размером отверстий 0,25 дюйма), и цемент был выбран в качестве типа II. Подробные процедуры

обсуждаются в отдельном отчете (Pamukci и Торси, 1991). Эксперименты 1 и 2 обобщил в своей работе Fang (1994a).

6.8.3.3.1. Мягкая морская глина

Испытание на разрушение под нагрузкой на двух мягких морских глинах показано на рисунках 6.22 и 6.23. Все образцы были пропущены через сито № 40. Содержание воды в формовочной смеси для всех образцов было постоянным и составляло 25 % при изменении веса формованной сухой единицы. Все образцы перед тестированием были высушены на воздухе. Нагрузка на излом и соответствующее изменение длины колеи были зарегистрированы. Рост трещин также определялся. В этом исследовании все образцы быстро провалились; следовательно, значение a на рисунке 6.21a принимается как длина между линией нанесения и общей длиной образца (= 2,5 дюйма).

6.8.3.3.2. Разрушающая нагрузка на мелкозернистую почву

Результаты уплотненного мелкозернистого грунта приведены в таблице 6.8. Измеренные значения нагрузки разрушения и рассчитанные значения вязкости разрушения K_c приведены для разных длин трещин a для одинаково подготовленных образцов в каждой группе.

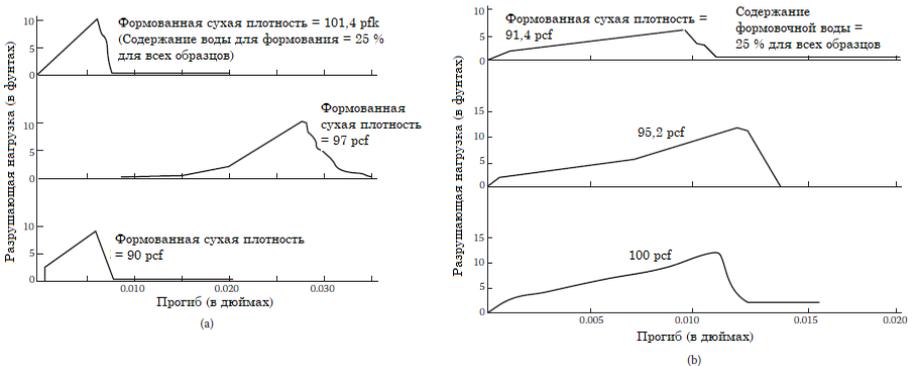


Рисунок 6.22. Нагрузка на трещину в зависимости от изменения длины колеи при различной плотности формованного материала: (а) морская глина Мексиканского залива и (b) морская глина залива Мэн (по Fang, 1994a, Proc. Int. Symp. on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Japan, S. Shibuya, T. Mitachi and S. Miura, eds. pp. 299–304. С разрешения ASCE).

6.8.3.3.3. Нарушение разрушения на загрязненных мелкозернистых почвах

Испытания на разрушение под нагрузкой на затвердевших иловых отходах суммированы, как показано на рисунке 6.24 (Pamukci и Торси, 1991). Результаты испытаний на нагрузку разрушения, по-видимому, подтверждают оценку других результатов испытаний, таких как неограниченная прочность на сжатие и прочность на растяжение. Все эти расчеты были проведены выше зоне абсолютной властности и температуры отверждения. Основная цель этих измерений состояла в том, чтобы увидеть, существует ли корреляция между

развитием прочности и нагрузкой на разрыв (P) в аналогичных условиях окружающей среды.



Рисунок 6.23. Нагрузка на разрыв против веса формованных сухих образцов глины с залива штата Мэн и Мексиканского залива (по Fang, 1994a, Proc. Int. Symp. on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Japan, S. Shibuya, T. Mitachi and S. Miura, eds. pp. 299–304. С разрешения ASCE).

Таблица 6.8. Сводка данных о сопротивлении на излом трех уплотненных мелкозернистых почв

Образец №	Длина трещины a (мм)	Нагрузка разрушения P (N)	Вязкость разрушения ($\text{МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$)
1	24,13	22,46	0,0979
	27,94	20,91	0,1064
	31,75	16,46	0,0988
	35,56	15,57	0,1134
	39,37	10,68	0,0981
2	26,67	18,24	0,0878
	27,94	19,57	0,0993
	33,02	15,57	0,0994
	35,56	12,90	0,0940
	38,10	9,79	0,0828
3	20,32	22,24	0,0846
	24,13	22,24	0,0969
	24,13	21,35	0,0930
	30,48	15,12	0,0856
	31,75	13,34	0,0801

Примечание: рассчитано по уравнению 6.2.

Рисунок 6.24а показывает изменение нагрузки разрушения в зависимости от времени отверждения для 16 % образцов с содержанием воды в смеси. Похоже, что образцы, отвержденные при температуре окружающей среды (20°C) и относительной влажности (65 %), гораздо более устойчивы к растрескиванию,

чем образцы, отвержденные в ином случае. Рисунок 6.24b показывает изменение нагрузки разрушения с увеличением содержания воды для образцов, отверждавшихся в течение 28 дней. Наблюдается постоянное снижение сопротивления разрушению для отвержденных при -20°C , при 100°C и высушенных на воздухе образцов с увеличением содержания воды.

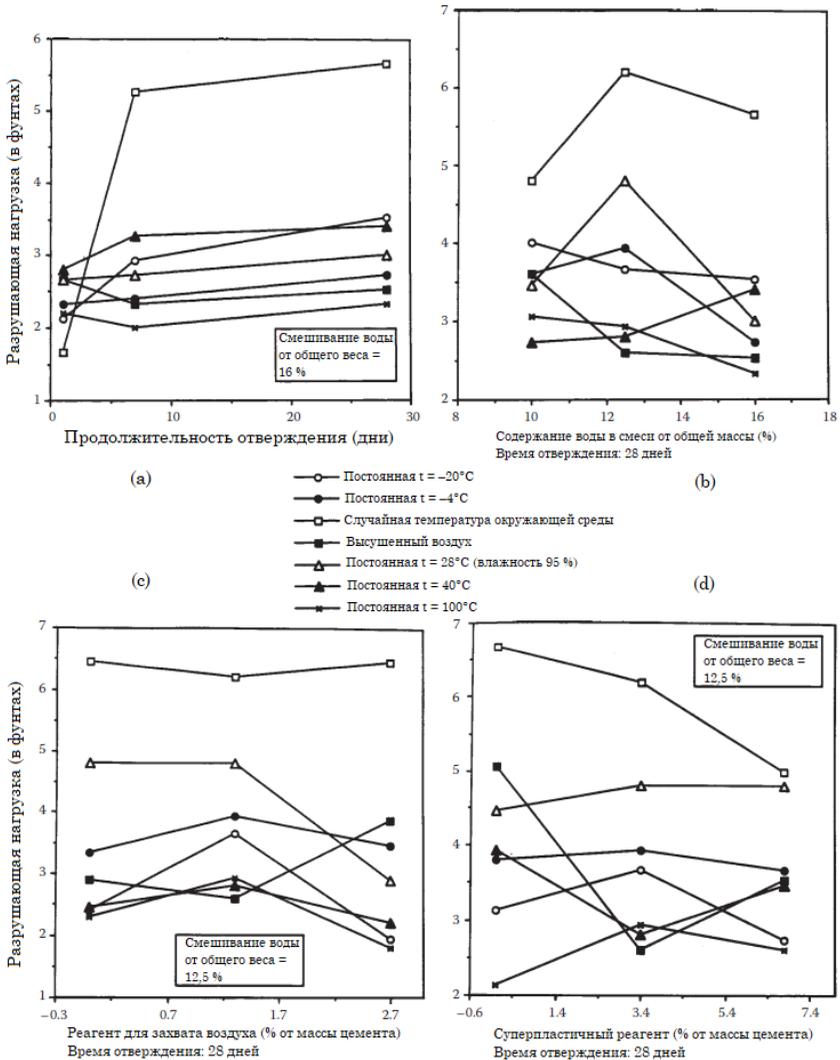


Рисунок 6.24. Испытание затвердевших иловых отходов на разрушение под нагрузкой: (а) влияние продолжительности отверждения; (б) влияние содержания воды в образцах, отверждавшихся в течение 28 дней; (с) влияние реагента для захвата воздуха; (д) влияние сверхпластического реагента (данные взяты из: Pamukcu, S. and Topcu, I. B. [1991], Study of

На рисунке 6.24с показано влияние увеличения процентного содержания пузырьков воздуха (процентное содержание реагента для захвата воздуха) на 28-дневные образцы. Тем не менее самые большие изменения наблюдались с замороженными образцами и отвержденными в камере влажности, в то время как не было значительных изменений с результатами образцов, находящихся в условиях окружающей среды. На рисунке 6.24d показано изменение нагрузки при разрушении с увеличением процентного содержания реагента суперпластификатора в смеси. В целом, добавление суперпластификатора, по-видимому, либо приводит к небольшому изменению, либо к уменьшению нагрузки разрушения.

Влияние факторов окружающей среды на разрушающую нагрузку, наблюдавшееся в этом эксперименте, представляется неубедительным, а потому необходимы дополнительные исследования для его изучения. Однако результаты большинства испытаний показывают, что может быть оптимальная пропорция реагента, которая приведет к более высокой устойчивости затвердевшей смеси к разрушению.

6.8.4. Выводы на основе данных о растрескивании и разрушении

Информация о растрескивании и разрушении почвы может быть использована в инженерной геологии. Об этом и поговорим далее.

6.8.4.1. Использование в качестве руководства в программе улучшение грунта

В разделе 6.6.1 указывается, что в естественных почвах или в почвах, созданных человеком, всегда существуют некоторые трещины из-за различных факторов окружающей среды. Испытания на растяжение и разрушение представляют собой методы количественного измерения для оценки растрескивания почвы. На рисунке 6.25 представлена схема, иллюстрирующая взаимосвязь растрескивания и времени протекания разных стадий этого процесса. Эта диаграмма используется в качестве основного руководства для оценки роста трещин в хрупких строительных материалах. При рассмотрении рисунка 6.25 видно, что начальная трещина размера C (точка a) может оставаться постоянной для большого количества циклов нагрузки, прежде чем будет отмечено ее увеличение. Расстояние от точки b до c называется стадией деградации. В этот период должны быть проведены работы по улучшению или восстановлению грунта, чтобы продлить срок полезного использования материала или конструкции; вскоре после этого быстро наступит срок полезного использования конструкции (точка c). Кроме того, на этом рисунке видно, что трещины, вызванные усадкой, растяжением и растрескиванием, связаны со сроком службы любых геоструктур, особенно при прогрессирующем разрушении склонов, эрозии и проблемах оползней.

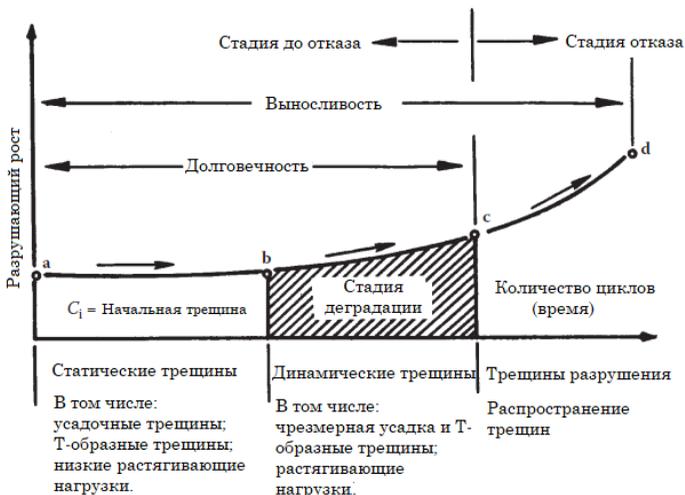


Рисунок 6.25. Схема, иллюстрирующая соотношение времени растрескивания на разных стадиях растрескивания.

6.8.4.2. Схемы растрескивания, используемые для идентификации и характеристики почвы

Шаблоны трещин могут быть использованы для идентификации или характеристики поведения почвы. Кроме того, цвет и рисунки могут использоваться вместе для идентификации и характеристики загрязненных мелкозернистых почв.

6.8.4.3. Внутренние трещины, используемые для оценки нарушения почвы

Характеристики внутреннего растрескивания грунта могут быть использованы для оценки прогрессирующей эрозии или прогнозирования потенциальных оползней. Этот тип измерения трещин может быть выполнен с использованием методов компьютерной томографии (СТ), как описано в разделе 6.7.6. Результаты испытания на растрескивание почвы являются количественным индикаторным свойством, которое должно коррелировать с другими параметрами производительности почвы, чтобы иметь существенное значение. Эти эксплуатационные испытания включают анализ растяжения, разрушения, анализ глинистой минеральной структуры и химический анализ поровой жидкости. Другими факторами, способствующими образованию трещин в почве, являются тип почвы, удельный вес, гранулометрический состав, коэффициент пустотности и геометрия первичной и вторичной высушивающихся поверхностей.

6.9. РЕЗЮМЕ

1. Усадка является одной из основных причин изменения объема, связанных с изменениями содержания воды в почве. Если в сухую почву добавляется вода, объем почвы увеличивается, и это явление называется набуханием. Следует отметить, что усадка и набухание не являются взаимобратными процессами,

однако между этими двумя процессами существует ограниченная линейная зависимость.

2. Сорбция включает как абсорбционные, так и адсорбционные процессы. Абсорбция – это механический процесс, а адсорбция – это физико-химический процесс.

3. Растрескивание почвы является естественным явлением из-за внутреннего энергетического дисбаланса в почве и изменений в местной среде. Рассматриваются четыре типа растрескивания, а именно: усадка, термическое растрескивание, растяжение и разрушение.

4. Характеристики растрескивания и разрушения принадлежат одной системе. Растрескивание представляет собой явление до разрушения материала, а разрушение – это поведение материала в растресканном состоянии; эти два явления взаимосвязаны. Ранее механика разрушения была связана главным образом с исследованиями металлов на трещиностойкость, однако данная концепция была расширена, чтобы включить в поле зрения такие материалы, как бетон, битумную смесь и стабилизированные почвы.

5. LEFM ограничивается линейно-упругими материалами, несмотря на тот факт, что пластическая или нелинейная деформация неизбежно преобладает вблизи дефектов или трещин. Тем не менее обеспечивается идеальный и простой способ оценки количества энергии, необходимой для создания свободных поверхностей в материале. LEFM не может быть применен к экспансивным глинам из-за сложных взаимодействий почвы и воды.

6. Испытание на неограниченное проникновение (UP) вводится для определения испытания на растяжение. Это просто и легко выполнить и удобно использовать в сочетании с обычным уплотнением и тестами CBR

ПРОБЛЕМАТИКА

6.1 Докажите, что предел усадки является функцией удельного веса воды, сухого удельного веса почвы и удельного веса твердых веществ.

6.2. Усадка глинистой почвы вследствие испарения воды прекращается, когда достигается определенное содержание воды; когда это происходит, глина все еще по существу насыщается. Объясните, почему так происходит.

6.3. Объясните различия между стандартным испытанием на растяжение при разрыве ASTM и испытанием на неограниченное проникновение (UP) для определения прочности на растяжение бетонных блоков, камня и уплотненной глины.

6.4. Почему так мало прочности на разрыв для насыщенного грунта? Почему содержание влаги так сильно зависит от прочности на сжатие?

6.5 Сравните режимы разрушения между испытанием на растяжение при расщеплении и испытанием на неограниченное проникновение (UP) для определения прочности на растяжение мелкозернистого грунта.

6.6. Почему концепция механики разрушения не может быть применена для оценки характеристик разрушения расширяющихся глин?

7. Гидропроводность и явления массопереноса

7.1. Введение

Количество воды, присутствующей в почвенной массе, значительно влияет на Техническое поведение почвы, потому что содержание воды будет влиять на состояние почвы под нагрузкой. Другое поведение, связанное с водой, зависит от свойств уплотнения (уплотнения), усадки, набухания, оседания и прогрессирующего разрушения. В этой главе обсуждаются капиллярная, гидравлическая проводимость и явления массового переноса. В приложениях подчеркиваются области техники укрепления грунта и процесса дезактивации почвы. Другие темы, такие как усадка, набухание, уплотнение, оседание и прочность, обсуждаются в главах 6 и 11.

7.2. Капиллярность

7.2.1. Общее обсуждение

Капиллярное поднятие воды вызвано поверхностным натяжением жидкости, как описано в разделе 5.2. Это происходит на стыке двух разных сред. Для почвы это происходит между поверхностью воды, минеральными зернами и воздухом. По существу, поверхностное натяжение возникает из-за различий в силах притяжения между молекулами материалов на границе раздела сред. Феномен капиллярности также может быть объяснен законом термодинамики. Все поверхности и границы раздела твердых тел и жидкостей являются участками свободной энергии, универсальная тенденция к уменьшению которых (Второй закон термодинамики) приводит к явлению поверхностного и межфазного натяжения. Одним из следствий этого является подъем жидкости в капилляре, стенки которого смачиваются жидкостью (то есть водой), и ее опускание в капилляре, стенки которого не имеют стремления к жидкости, например такой, как ртуть.

7.2.2. Высота и скорость капиллярного подъема

7.2.2.1. Высота капиллярного подъема

Существует два типа капиллярных явлений: вертикальный и горизонтальный. Основное уравнение для капиллярного подъема или опускания выглядит следующим образом:

$$h_c = \frac{4T \cos \alpha}{d\gamma_w} \quad (7.1)$$

где h_c – высота подъема капилляра, в см; T – поверхностное натяжение, дин/см; α – угол смачивания; d – диаметр капилляра, в см; γ_w = удельный вес воды; g – сила тяжести, см/с²; r – радиус капиллярного подъема.

Схема капиллярного подъема (h_c) представлена на рисунке 7.1a. Изменение насыщенности (S) показано на рисунке 7.1b для типичного гранулированного

материала. Уровень насыщения составляет 100 % вплоть до высоты h_2 , которая контролируется самыми большими диаметрами пор. После высоты h_2 уровень насыщения уменьшается с высотой. Соответствующее распределение отрицательного порового давления показано на рисунке 7.1с.

Поскольку $4/d$ равно отношению смачиваемого периметра к поперечному сечению столба жидкости, а также отношению смачиваемого участка к объему жидкости на единицу длины столба жидкости, уравнение 7.1 можно записать в таком виде:

$$h_c = \frac{ST}{n\gamma g} \quad (7.2)$$

где S – внутренняя или капиллярная поверхность на единицу объема, а n – поровое пространство на единицу объема.

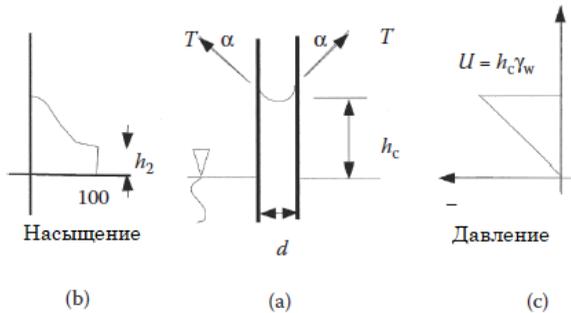


Рисунок 7.1. Подъем капилляров и его влияние на насыщение и давление.

Уравнение 7.2 достаточно хорошо выполняется для не набухающих почвенных систем, в которых толщина сильно адсорбированных водяных пленок пренебрежимо мала по сравнению с размерами пор, где особенно важно экспериментально определить потенциальный капиллярный подъем или «всасывание» в почве. Основываясь на базовой физике, уравнение 7.1 для воды можно упростить так:

$$h_c = 0,3/d \quad (7.3)$$

где d – диаметр пустот между частицами почвы, в см.

Поскольку значение d получить трудно, Terzaghi (1942) предложил использовать $d = D_{10}$ (эффективный размер, раздел 4.4) частицы почвы. Тогда высота подъема капилляра определяется следующим образом:

$$h_c = 0,3/D_{10}, \text{ см} \quad (7.4)$$

Кроме того, Terzaghi пишет, что h_c можно оценить по коэффициенту пустотности e и D_{10} :

$$h_c = C/e D_{10}, \text{ см} \quad (7.5)$$

где C – постоянная, которая варьируется от 0,1 до 0,5.

7.2.2.2. Скорость капиллярного подъема

Часто скорость роста капилляров важнее, чем конечная высота. В таком случае может быть использовано следующее уравнение:

$$t = \frac{nh_c}{k} \left[\ln \frac{h_c}{h_c - z} - \frac{z}{h_c} \right] \quad (7.6)$$

где t – время, необходимое для подъема мениска капиллярной воды на высоту z над уровнем свободной воды; n – пористость; k – коэффициент проницаемости почвы; h_c – потенциал капилляра, высота подъема капилляра и z – расстояние капиллярного мениска от уровня грунтовых вод.

7.2.3. Факторы, влияющие на рост капилляров

7.2.3.1. Влияние времени и размера частиц почвы

Криволинейная зависимость наблюдается между высотой капилляра как функцией времени и типа почвы. Эта взаимосвязь тесно связана с размером частиц почвы, как показано на рисунке 7.2. Тем не менее местные условия играют важную роль в повышении капиллярности, что отражено на рисунке 7.2.

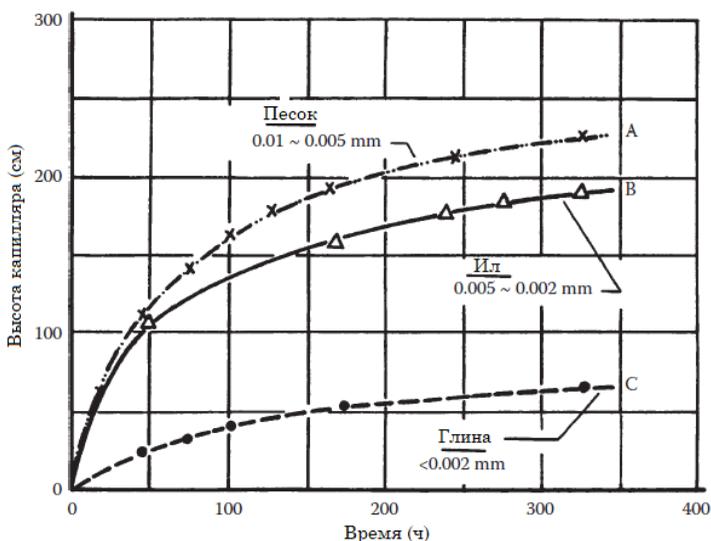


Рисунок 7.2. Высота капилляра в зависимости от времени для частиц разных размеров (по Tianjin University [1978], Soil Mechanics and Foundation Engineering, Chinese Construction Publ., Beijing [на китайском]).

7.2.3.2. Влияние влагосодержания и типов поровых флюидов

Содержание влаги, размер зерен почвы и ее структура, угол контакта влияют на величину капиллярного потенциала из-за их влияния на радиусы кривизны водно-клиновых поверхностей. Если частицы почвы не полностью смачиваются водой (ненасыщенная почва), угол контакта между менисками и частицами почвы будет больше нуля. Увеличение угла контакта будет иметь тенденцию уменьшать

кривизну мениска и тем самым уменьшать капиллярный потенциал почвы при данном содержании воды.

7.2.3.3. Влияние температуры

Поверхностное натяжение воды является обратной функцией температуры. Следовательно, снижение температуры увеличивает поверхностное натяжение и уменьшает капиллярный потенциал, а также другие факторы, такие как растворенные соли, потому что увеличение количества растворенной соли в почвенной воде увеличивает ее поверхностное натяжение и тем самым снижает капиллярный потенциал почвы.

7.2.4. Капиллярные измерения

7.2.4.1. Общее обсуждение

Существует несколько методов измерения для оценки подъема жидкости в капиллярах и капиллярных явлений в почвах: метод капилляриметра и открытой трубки (Lane и Washburn, 1946), испытания на проницаемость и капиллярность (Taylor, 1948; Lambe и Whitman, 1979), стандартный метод ASTM для измерения зависимости капиллярной влаги для почв с помощью аппарата с мембранным давлением (ASTM D3152) и для натяжения влаги между 0,1 и 1 атм (10 и 101 кПа) (ASTM D2325).

Доступны и другие возможности оценки потенциального подъема жидкости в капиллярах, такие как применение измерителя натяжения грунта Ричардса, капиллярный потенциал почв *in situ*, разработанный Russell и Spangler (Spangler, 1951), или «всасывание» в почве, которое предложил Marshall (1959). Капиллярный потенциал или свободную энергию измеряли с помощью измерителя натяжения, аппарата с мембранным давлением и метода адсорбции пара. Winterkorn (1963) представил взаимосвязи между размером зерна, капиллярным подъемом, внутренней поверхностью, пористостью и гидравлической проводимостью гранулированных почвенных систем.

7.2.4.2. Типичные результаты испытаний и комментарии к ним

Результаты испытаний, проведенных с использованием различных методов в разных условиях окружающей среды, представлены на рисунке 7.3. При рассмотрении рисунка 7.3 можно высказать некоторые комментарии: уравнение 7.2 достаточно хорошо выполняется для не набухающих грунтовых систем, в которых толщина сильно адсорбированных пленок воды незначительна по сравнению с размерами пор. Уравнение 7.5, предложенное Terzaghi, основано на экспериментальных данных, которые предоставили Lane и Washburn (см. рисунок 7.3), вместе с другими экспериментальными данными. Экспериментальные результаты лабораторных испытаний опентуба и капилляриметра лежат между двумя линиями; уравнение 7.5 служит верхним пределом, а уравнение 7.4 служит нижним пределом. Рисунок 7.3 показывает, что чем меньше размер частиц, тем больше h_c . После периода в 300 часов уровень h_c достигает равновесия для всех трех размеров зерна независимо от размеров частиц почвы.

На основании полевых наблюдений для различных типов почв из строительных проектов, как показано на рисунке 7.3, указано, что для почвы без когезии h_c близка к значениям, предсказанным по уравнению 7.4. Для мелкозернистой почвы и для большинства полевых наблюдений h_c не будет превышать нескольких метров. Все полевые наблюдения как в местах строительства, так и на полигонах основаны на линии поверхности свободной воды, расположенной у профиля почвы и/или горизонтов при раскопках. Для зернистой почвы, такой как чистый однородный песок или гравий, в h_c преобладает эффективный размер зерна (D_{10}). Однако для мелкозернистой почвы h_c зависит не только от размера зерна, но также и от гранулометрического состава, глинистого минерального состава, порового флюида, истории напряжений, а также от местных факторов окружающей среды.

Уравнения 7.4 и 7.5, предложенные Terzaghi, действительны, когда D_{10} больше 0,02 мм. Кроме того, скорость роста капиллярности зависит от размеров частиц почвы. Например, для частиц размером от 0,005 до 0,01 мм требуется 7 дней, чтобы достичь высоты капилляра 2,0 м. Однако для частиц размером менее 0,002 мм требуется гораздо больше времени, возможно, даже месяцы, чтобы достичь той же самой высоты.

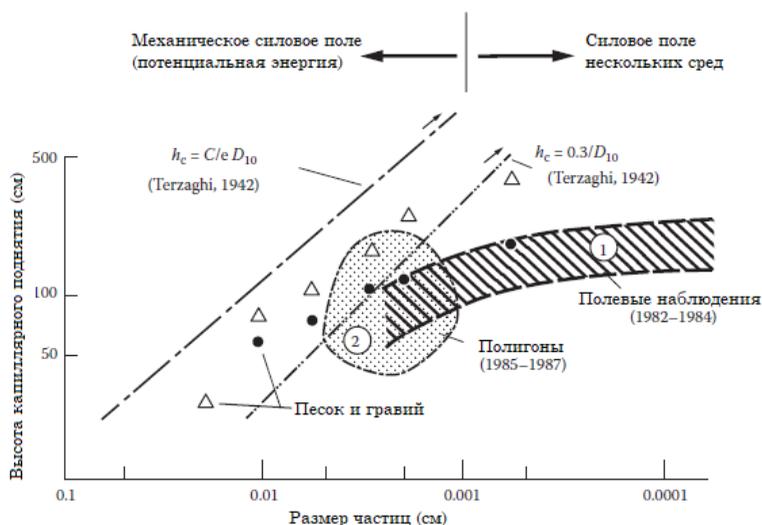


Рисунок 7.3. Взаимодействие почва – вода – окружающая среда, отражающееся на подъеме жидкости в капиллярах

7.3. ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ

7.3.1. Закон Дарси

Пустые пространства между зёрнами почвы позволяют жидкостям течь через них. Мера, которая описывает эту способность почвы пропускать жидкости, – это ее проницаемость. На проницаемость влияет ряд факторов. Этими факторами

являются (1) эффективный размер зерна или эффективный размер пор, (2) формы пустот и путей прохождения через поры почвы и каналы, (3) насыщенность и (4) вязкость проникающего вещества. Насыщенный поток через пористую зернистую среду в соответствии с законом Дарси показан в следующем уравнении (Darcy, 1856):

$$v = k_i = Q/A \quad (7.7)$$

где Q – скорость потока, м³/с; k – постоянная, известная как коэффициент проницаемости Дарси, м/с; i – гидравлический градиент; A – площадь поперечного сечения, через которую может проходить поток, м². Это уравнение предполагает линейную зависимость между средней поверхностной скоростью жидкости и гидравлическим градиентом, при этом константа пропорциональности или коэффициент проницаемости k являются уникальными для данной почвы при определенной пористости, температуре и давлении. Скорость v называется скоростью приближения или поверхностной скоростью (Taylor, 1948). Гидравлический градиент (i) определяется следующим образом:

$$i = \Delta h/L \quad (7.8)$$

где h – разность пьезометрических напоров, L – расстояние, на котором возникает разность напоров.

Если гидравлический градиент i равен единице, то скорость v из уравнения 7.7 равна k . Средняя эффективная скорость v_s потока через поровые пространства почвы может быть рассчитана так:

$$v_s = v A/A_v = v V/V_v = v/n \quad (7.9)$$

где v_s – средняя эффективная скорость, также известная как скорость просачивания, м/с; A – общая площадь поперечного сечения образца почвы, м²; A_v – площадь пустот в почвенном образце, м²; V – общий объем образца почвы, м³; V_v – объем пустот в почвенном образце, м³; n – пористость.

7.3.2. Гидравлический напор и энергия

Чтобы выразить как потенциальную, так и кинетическую энергию жидкости, термин *напор* обычно используется для обозначения энергии на единицу массы. Есть три типа напоров, относящихся к потоку жидкости в почве: гидростатический напор (h_p), статический напор (h_e) и скоростной напор (h_v). h_p – это высота, на которую вода поднимается в пьезометре над рассматриваемой точкой. В геотехнических моделях h_p необходим для расчета давления в поровой воде и эффективного напряжения (таблица 7.3). h_e – это расстояние от базовой линии, как показано на рисунке 7.4. Гидростатический напор плюс статический напор ($h_p + h_e$) называют общим напором или пьезометрическим напором. Общий напор используется в законе Дарси для вычисления гидравлического градиента i , как показано в уравнении 7.8. Следует отметить, что скоростной напор (h_v) в почве имеет очень малую величину и им можно пренебречь для практического применения; тем не менее для оценки миграции загрязнения не следует пренебрегать скоростью в почве.

7.3.3. Гидравлические уравнения проводимости

7.3.3.1. Теоретические отношения

Определение гидравлической проводимости осуществлялось как на теоретической, так и на эмпирической основе. Далее будут рассмотрены оба этих подхода.

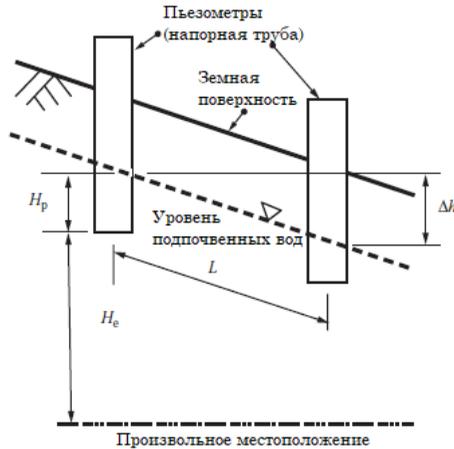


Рисунок 7.4. Схематическое изображение высоты столба и статического напора.

7.3.3.1.1. Уравнение Пуазейля–Хагена

Уравнение 7.7 описывает закон Дарси для гидравлической проводимости в почвах, представляющий по существу ламинарное течение жидкости, если k – коэффициент гидравлической проводимости или проницаемости. Из-за ламинарной природы потока теоретический расчет k был сделан рядом ученых на основе фундаментального уравнения Пуазейля–Хагена для проточных капилляров:

$$V' = \frac{\pi r^4}{8 \eta} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L} \quad (7.10)$$

где V' – объем воды, выходящий во времени (t); r – внутренний радиус капилляра; η – вязкость жидкости; а $\Delta P/\Delta L = i$, то есть гидравлическому градиенту.

7.3.3.1.2. Уравнение Козени–Кармана

Наиболее известной попыткой теоретического вывода k является, пожалуй, уравнение Козени–Кармана:

$$k = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{1}{k_p t^2 S^2} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad (7.11)$$

где k_p – коэффициент формы пор; t – извилистость; S – удельная поверхность на единицу объема; n – пористость; η – коэффициент вязкости жидкости.

7.3.3.1.3. Уравнение Винтеркорна (Winterkorn, 1942, 1963)

Уравнение Винтеркорна основано на уравнении Пуазейля–Хагена для проточных капилляров, как уравнение 7.10. Учитывая пористость почвенной системы из-за наличия (n_c) капилляров эффективного радиуса (r) на единицу поперечного сечения, мы можем умножить обе стороны уравнения Пуазейля на n_c и приравнять произведение к V/A из уравнения Дарси (уравнение 7.9). В таком случае мы получаем:

$$k = \frac{(n_c) \cdot V'}{it} = \frac{\pi r^4}{8\eta} \cdot (n_c) \quad (7.12)$$

$$n = \pi r^2 n_c \quad (7.13)$$

Подставив значение n из уравнения 7.13 в уравнение 7.12 для k , получаем:

$$k = \frac{nr^2}{8\eta\ell} \quad (7.14)$$

где k называется коэффициентом передачи; он пропорционален пористости (n) и внутреннему радиусу капиллярности (r). Уравнение 7.14 достаточно хорошо выполняется для систем пористости, в которых нет заметного взаимодействия между стенками пор и водой. В случае заметного взаимодействия почвы и воды уравнение должно быть записано в таком виде:

$$k = \frac{(n - n_r)(r - r_r)^2}{8\eta\ell} \quad (7.15)$$

где n_r – поровое пространство, а r_r – часть радиуса, занимаемая удерживаемой водой, которая не участвует в потоке.

Уравнения 7.13 и 7.14 могут быть дополнительно изменены, если рассматривать $[r^2/4]$ как упрощенное выражение $[r^2\pi/2r\pi]^2$, которое также соответствует квадрату отношения пористости (n), поэтому поверхность стенки поры (S) можно рассчитать по гранулометрическому составу (n) или по результатам адсорбционных экспериментов. Диапазон применения этих и подобных уравнений ограничен однородными образцами почвы, не содержащими вторичных скоплений почвенных частиц.

7.3.3.2. Эмпирические отношения

Сложные эмпирические линейные отношения были предложены в попытке учесть фактические условия прохождения потока через мелкозернистые почвы (Michaels и Lin, 1955; Olsen, 1965; Mitchell, 1976). Эти линейные отношения обычно зависят от различных функций, связанных с отношением пустот (см. рисунок 7.5).

7.3.4. Гидравлические измерения проводимости

Гидравлическая проводимость или коэффициент проницаемости k , определенный в уравнении 7.7, может быть измерен в лаборатории и/или в полевых условиях. Существуют многочисленные методы, доступные прямо или косвенно для получения этого значения. Лабораторные испытания могут

проводиться с использованием двух различных второстепенных прибора. Эти два прибора – это настенные пермеаметры, жесткий или гибкий. С использованием любого из них доступны три основных подхода к проведению теста на проницаемость. Этими различными подходами являются: (1) применение пермеаметра для переменного или падающего напора, (2) применение пермеаметра для постоянного напора и (3) применение проточного насоса пермеаметра. Кроме того, гидравлическая проводимость также может быть рассчитана из теста на консолидацию (уравнение 11.7). Использование пермеаметра для измерения гидравлической проводимости было стандартизировано (ASTM D2434) и описано в различных стандартных учебниках по методам тестирования почвы.

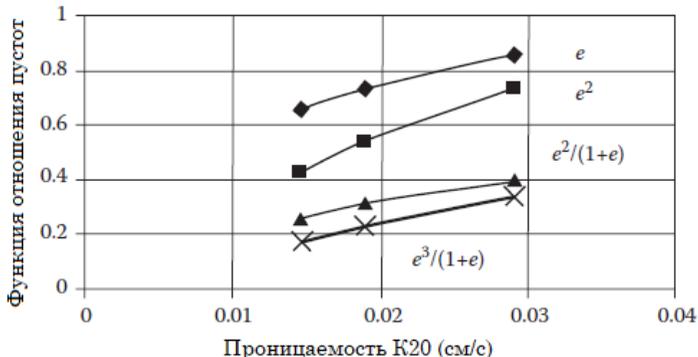


Рисунок 7.5. Коэффициент пустотности зависит от проницаемости (Chaney, R. C. and Almagor, G. [2016], Seafloor Processes and Geotechnology, CRC Press, Boca Raton, FL. С разрешения).

Коэффициент проницаемости k можно определить следующим образом:

$$k = \frac{V}{Ait} \quad (7.16)$$

где V – выход воды за время t ; A – площадь поперечного сечения образца; $i = \Delta P/L$, то есть разность давлений на двух концах образца.

Для пермеаметра с падающим напором:

$$k = 2.3 \frac{La}{At} \log \frac{h_1}{h_2} \quad (7.17)$$

где a – площадь поперечного сечения стояка, в которой гидравлический напор падает от h_1 до h_2 за время t , а объем воды $a(h_1-h_2)$ течет через образец почвы толщиной L .

Другие методы включают в себя расчеты площади поверхности частицы на объем пор и ее пористости, сделанные Winterkorn (1963), на основе экспериментальных результатов, представленных HRB (1959). Кроме того, значение k можно оценить по эффективному размеру D_{10} , как это предложил Hazen (1911). Также k можно рассчитать по результатам испытаний на просачивание, прокачку и давление в полевых условиях.

Сравнение k из лабораторных измерений и расчетов различных типов почв представлено на рисунке 7.6. Как видно из рисунка, существуют большие различия между этими методами.

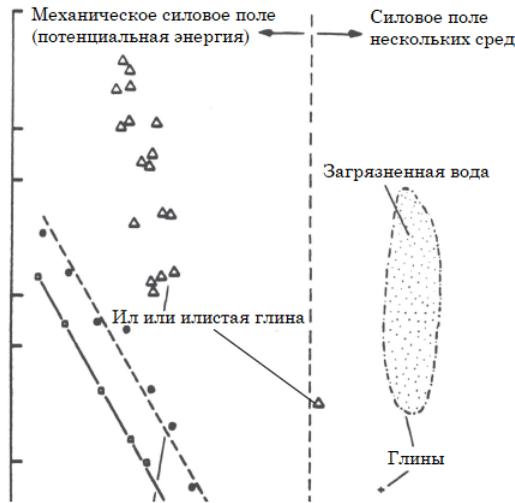


Рисунок 7.6. Сравнение гидравлической проводимости (k), полученной с помощью измеренных и расчетных методов.

Таблица 7.1. Сводка и сравнение лабораторных и полевых испытаний на проницаемость

Тип испытания на проницаемость	Глина 1		Глина	
	Среднее значение k (см/с)	$k_{\text{фактическая}} / k_{\text{средняя}}$	Среднее значение k (см/с)	$k_{\text{фактическая}} / k_{\text{средняя}}$
Испытание на облицованном водоеме	9×10^{-6}	1,0	4×10^{-6}	1,0
Все лабораторные тесты на лабораторных компактных образцах	1×10^{-8}	900	2×10^{-9}	2000
Лабораторные испытания (гибкая стенка) на образцах ручной резбы	1×10^{-8}	900	3×10^{-9}	1300
Лабораторные испытания (гибкая стенка) на пробирках Шелби	1×10^{-8}	900	3×10^{-9}	1300
Лабораторные испытания на образцах с ручной резбой, усеченных в уплотнительное кольцо и испытанных при эффективном напряжении 96 кПа	1×10^{-7}	90	4×10^{-8}	100
Кольцевая инфильтрационная проба	5×10^{-6}	1,9	3×10^{-6}	1,2

Сравнение гидравлической проводимости, определенной различными лабораторными методами, представлено в таблице 7.1. Лабораторные методы, представленные в этой таблице, сравниваются с крупномасштабным испытанием в водоеме *in situ*. Считается, что более масштабное испытание дает более репрезентативную гидравлическую проводимость в полевых условиях (k), потому что включены макроэлементы (то есть линзы осадка, трещины). Обзор таблицы 7.1 показывает несколько тенденций. Эти тенденции: (1) чем больше образец для

испытаний, тем лучше оценка гидравлической проводимости, (2) испытания на консолидацию лучше, чем трехосные испытания с гибкой стенкой, (3) ненарушенные образцы лучше, чем лабораторные уплотненные образцы, (4) триаксиальные испытания с гибкой стенкой лучше, чем с пермеатром с фиксированной стенкой.

7.3.5. Факторы, влияющие на результаты проводимости

7.3.5.1. Общее обсуждение

При рассмотрении рисунка 7.6 наблюдаются большие различия в результатах гидравлической проводимости, особенно для мелкозернистых почв. Понимание влияния поровых флюидов на поведение глины имеет важное значение для проектирования многих компонентов фундаментных конструкций, особенно для систем локализации опасных и токсичных отходов. Существует множество факторов, влияющих на мелкозернистую почву, но наиболее важными факторами являются обменные ионы, температура и т. д. На рисунке 7.7 представлено сравнение проницаемости между природными и гомоионными (то есть ионами того же типа) почвами, включая аттапульгитовые и бентонитовые глины. Также были получены значительные результаты, вызванные обменными ионами и влиянием температуры на коэффициент проницаемости слабоорганической глины. Испытания, проведенные путем тестов на уплотнение в двух температурных диапазонах, показаны на рисунке 7.8. Фактический механизм потока через поровые пространства гранулированного материала также был изучен с использованием компьютерной томографии (СТ) и индуктивно-связанной плазмы (ICP) Steude и соавторами (1990).

7.3.5.2. Гидравлическая проводимость загрязненной почвы

Поровые флюиды значительно влияют на гидравлическую проводимость, и далее здесь представлен краткий обзор. Waidelich (1958) использовал тесты на уплотнение для расчета коэффициента проницаемости каолиновых и бентонитовых глин с различными порами, как показано на рисунке 7.9. Green и соавторы (1980) изучали влияние органических растворителей на проницаемость глин. Исследование показало, что в целом проницаемость глин для органических растворителей была стабильно ниже, чем для воды. Было обнаружено, что проницаемость со временем снижалась и достигала равновесия через несколько недель. Результаты проницаемости хорошо коррелировали с диэлектрической проницаемостью поровой жидкости (раздел 9.7); чем ниже диэлектрическая проницаемость, тем ниже проницаемость.

Нахо (1981) представил исследование для определения долговечности материалов футеровки для объектов по удалению опасных отходов. Все испытания проводились на бентонит-песчаных примесях, а также на природных глинистых почвах. В тесте на постоянную проницаемость напыления отходы, включая кислотные, щелочные, свинцовые и маслянистые вещества, помещались над уплотненным мелкозернистым грунтовым слоем. Результаты испытаний заключаются в том, что жидкости, собранные после более чем трех лет выдержки, в основном нейтральны и имеют высокое содержание твердых веществ, в

большинстве случаев соленых. В таблице 7.2 приведены результаты, полученные для трех почв с самым высоким содержанием глины в воде и четырех органических растворителей (Schram, 1981). Anderson и Brown (1981) сделали исследование, в котором два минерала смектитовой глины были пронизаны органическими жидкостями. Проникающими веществами были уксусная кислота, анилин, ацетон, этиленгликоль, гептан и ксилол. Часть результатов представлена на рисунке 7.10. Таким образом, значительное увеличение проницаемости было получено с основными нейтральными полярными и неполярными органическими жидкостями по сравнению со значениями, полученными с водой.

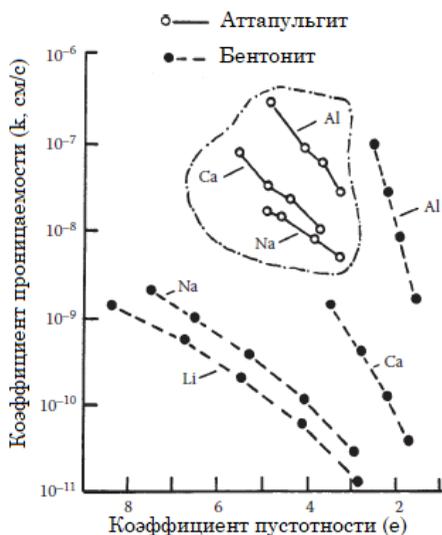


Рисунок 7.7. Сравнение значений проницаемости между естественными и гомоионными почвами. Значения проницаемости, рассчитанные по результатам консолидации. (По Veels, E. and Winterkorn, H. F. [1967], Engineering Properties of Several Pure Clays as Functions of Mineral Type, Exchange Ions and Phase Composition, HRR no. 209, pp. 55–65. Этот материал является собственностью Правительство США, но находится в свободном доступе и не подлежит защите авторских прав.)

О коэффициенте проницаемости по сравнению с количеством добавленной поровой жидкости пишут Alther и соавторы (1985). Используются четыре типа поровых флюидов, и набор типичных результатов представлен на рисунке 7.11. На рисунке 7.12 представлено сравнение между водой и анилином на подготовленном в лаборатории материале глиняного вкладыша. Обзор рисунка 7.12 показывает, что коэффициент проницаемости (то есть гидравлическая проводимость) значительно снижается из-за проникновения анилина по сравнению с водой. Гидравлическая проводимость уплотненного монтмориллонита с бензолом и ацетоном показана на рисунке 7.13 (Asar и Olivieri, 1989). И снова получены значительные результаты о сходстве между двумя поровыми жидкостями.

Основываясь на обзоре литературы, можно сделать некоторые обобщения о гидравлической проводимости, связанной тем, что поры загрязнены жидкостью:

1) гидравлическая проводимость увеличивается с увеличением процентного содержания многовалентных катионов в поровой жидкости;

2) гидравлическая проводимость увеличивается при введении органики; эти увеличения могут быть связаны с дипольным моментом и диэлектрическими постоянными растворителей;

3) гидравлическая проводимость увеличивается с увеличением концентрации соли в поровой жидкости.

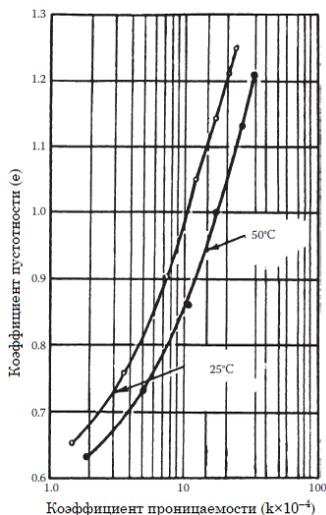


Рисунок 7.8. Влияние температуры на коэффициент проницаемости слабоорганической глины (по Habibagahi, K. [1976], *Geotech. Eng.*, v. 7, no. 2, pp. 95–108)

7.3.5.3. Триаксиальный пермеаметр для загрязненной жидкости пор

Измерение гидравлической проводимости мелкозернистых почв с использованием опасных и токсичных проникаемых веществ требует оборудования, специально разработанного и изготовленного для этой цели. Evans и Fang (1986, 1988) разработали гибкий пермеаметр триаксиального типа с гибкими стенками для этой цели в университете Лихай в 1986 году на основе конструкции трехосной системы Чейни (1981). Важное значение при изучении загрязненной поровой жидкости имеет учет взаимодействия поровых флюидов в почвах и получаемый в результате отклик почвы, а также совместимость между испытательным оборудованием и проникающими веществами. Кроме того, для моделирования системы, которая может адекватно определять влияние опасных и токсичных проникающих веществ на гидравлическую проводимость мелкозернистых почв, должен быть включен метод моделирования состояния напряжения и проницаемости относительно полевых условий.

Система испытаний, разработанная для гидравлических тестов на проводимость с опасными и токсичными проникающими веществами, состоит из трех основных компонентов. Это панель управления, плата проницаемости и трехосная ячейка. Необходимые коэффициенты прочности и совместимости были достигнуты благодаря оптимальному использованию нержавеющей стали и алюминия для достижения достаточной жесткости с обеспечением при этом

максимальной совместимости благодаря использованию Тефлона® в любой точке, в которой пермеаметр находится в контакте с проникающим веществом. Evans и Fang (1986) обсуждают вопросы, касающиеся конструкции и изготовления оборудования и его особой применимости для испытаний опасных и токсичных проникающих веществ.

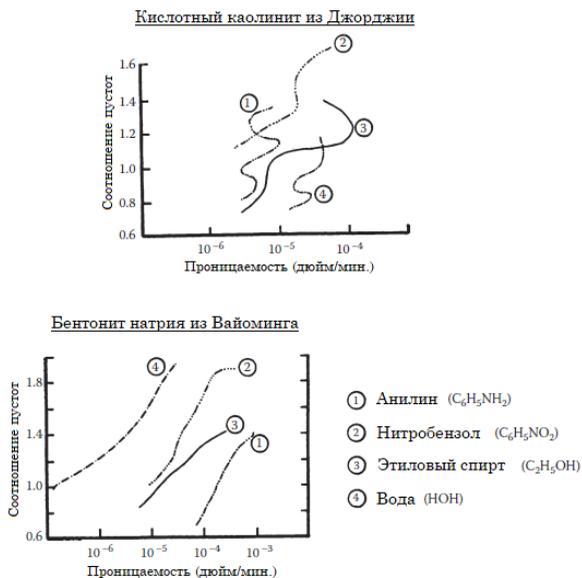


Рисунок 7.9. Соотношение проницаемость–пустота для каолиновых и бентонитовых глин с различными порами. (По Waidelich, W. C. [1958], Influence of liquid and clay mineral type on consolidation of clay–liquid systems, HRB Special Report 40, pp. 24–42. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не подлежит защите авторских прав.)

Таблица 7.2. Внутренняя проницаемость трех глинистых почв для воды и четырех органических растворителей

Проникающие жидкости		Внутренняя проницаемость (cm^2)		
		Озерная глина (иллит и каолинит)	Николсон (вермикулит)	Фанно мориллонит и слюда)
Неполярно-ароматическая (кислота)	0,03 ^a	$1,4 \times 10^{-8}$	$2,9 \times 10^{-9}$	$1,5 \times 10^{-7}$
Неполярно-алифатическая (керосин)	–	$1,0 \times 10^{-9}$	$2,9 \times 10^{-9}$	$1,6 \times 10^{-7}$
Полярный гликоль (этиленгликоль)	0,48 ^a	$2,4 \times 10^{-9}$	$1,4 \times 10^{-10}$	$6,3 \times 10^{-8}$
Полярный спирт (изопропиловый спирт)	0,25 ^a	$6,4 \times 10^{-9}$	$6,8 \times 10^{-10}$	$9,3 \times 10^{-8}$
Вода	1 ^b	$5,1 \times 10^{-10}$	$4,3 \times 10^{-11}$	$1,6 \times 10^{-9}$

^a Диэлектрическая проницаемость.

^b Диэлектрическая проницаемость воды.

Источник: по Schram (1981), Permeability of soils to four organic solvents and water, MSCE Thesis, University of Arizona, Tucson, AZ.

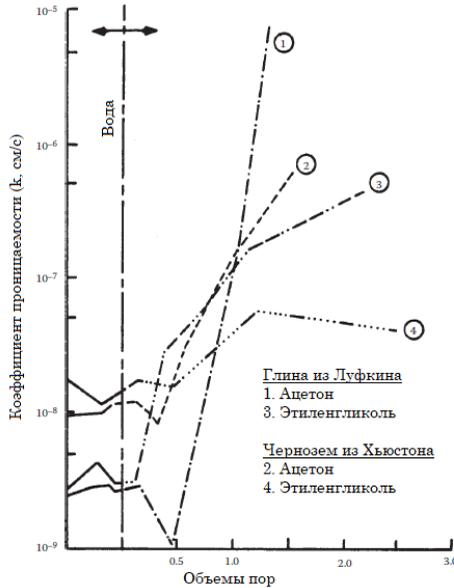


Рисунок 7.10. Проницаемость в зависимости от объема пор для некоторых природных почв с различными порами (по Anderson, D. and Brown, K. W. [1981], Organic leachate effects on the permeability of clay liners, U.S. EPA Report no. 600/98-10-02b, pp. 119-130. Этот материал является собственностью Правительство США, но находится в свободном доступе и не подлежит защите авторских прав).

7.4. Инфильтрация, перколяция и водоудержание

7.4.1. Характеристики инфильтрации

7.4.1.1. Общее обсуждение

Роль инфильтрации в гидрологическом цикле впервые была обсуждена Хортоном в 1933 году. Инфильтрация определялась как проход воды в почву через ее поверхность. Во время ливня инфильтрация обычно начинается с высокой скоростью и уменьшается до минимума по мере продолжения дождя. Во время шторма выпадение осадков может осуществляться несколькими способами: (1) перехват навесом растительного покрова; (2) удержание в углублениях на поверхности земли; (3) прямое проникновение; (4) испарение; (5) испарение транспирации; (6) поверхностный сток.

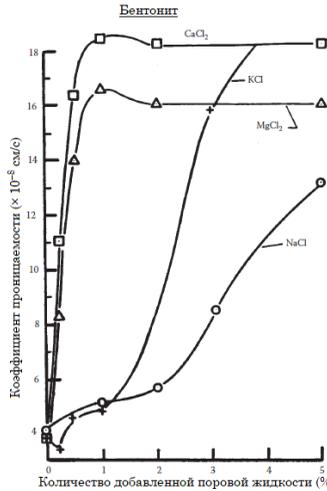


Рисунок 7.11. Коэффициент проницаемости в зависимости от количества поровой жидкости (по Alther, G., Evans, J. C., Fang, H. Y., and Witmer, K. [1985], Influence of inorganic permeants upon the permeability of bentonite, ASTM STP 874, pp. 64–73).

7.4.1.2. Скорость проникновения или емкость

Уровень инфильтрации в стационарном режиме (f_c) или пропускная способность, возникающая после большого периода времени, является максимальной скоростью, с которой почва в данном состоянии может поглощать дождевую воду при ее падении. Скорость инфильтрации будет экспоненциально уменьшаться во времени от максимального начального значения (f_0) до более низкой постоянной скорости. Фактическая скорость инфильтрации $f(t)$ всегда меньше, чем f_c , за исключением случаев, когда интенсивность осадков (i) равна или превышает f_c . Она также экспоненциально уменьшается со временем, так как почва становится насыщенной, а ее частицы набухают.



Рисунок 7.12. Влияние поровой жидкости на проницаемость песчано-бентонитовой смеси (по Evans J. C. and Fang, H. Y. [1988], Triaxial permeability and strength testing of contaminated soils, ASTM STP 977, pp. 387–404).

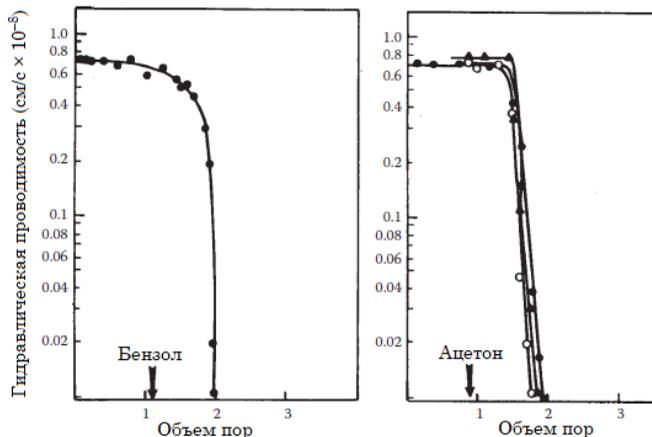


Рисунок 7.13. Гидравлическая проводимость уплотненного Са-монтмориллонита с бензолом и ацетоном (по Asar Y. B. and Olivieri, I. [1989], HRB Annual Meeting, 24 p. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не подлежит защите авторских прав).

Таблица 7.3. Типичные значения параметров инфильтрации Хортон

Тип почвы	f_c (дюйм/ч)	f_0 (дюйм/ч)	k (мин. ⁻¹)
Суглинистый песок	11,3	1,9	0,26
Супеси	14,8	1,8	0,33
Песчано-суглинистый песок	6,2	2,4	0,08
Песок	23,0	1,8	0,55

Источник: адаптированные данные из: Rawls et al. (1976), Calibration of selected infiltration equations for the Georgia Coastal Plain, Agricultural Research Service ARS-S-113, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.

Факторы, которые влияют как на размер, так и на скорость инфильтрации, – это в первую очередь факторы, которые характеризуют размеры частиц почвы и их относительную проницаемость: (1) структура и пористость почвы, (2) время по отношению к количеству инфильтрации и (3) тип использования земли в связи с инфильтрацией. Скорость инфильтрации или емкость $f(t)$ почвы можно определить с помощью уравнения Хортон (Horton, 1933). Если интенсивность осадков больше, чем интенсивность или пропускная способность в стационарном режиме, тогда $f(t)$ можно оценить следующим образом:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-k(t-t_0)}$$

где

$f(t)$ – скорость инфильтрации (мм/ч) в момент времени t (мин.);

f_c – стационарная скорость инфильтрации, возникающая при больших значениях t ;

f_0 – начальная скорость проникновения в момент начала инфильтрации ($t = t_0$);

k (мин.⁻¹) – коэффициент затухания.

Это уравнение моделирует уменьшение скорости инфильтрации как функции времени, а также моделирует скорость инфильтрации, уменьшающуюся по мере насыщения почвы. Типичные значения параметров инфильтрации Хортоня предоставили Rawls и соавторы (1976), см. таблицу 7.3. Анализ взаимосвязи между проницаемостью и инфильтрацией также представили Leslie и Chaney (1992).

7.4.2. Проникновение воды через поверхность дорожного покрытия

На устойчивость дорожной насыпи отрицательно влияет наличие свободной воды в конструкции дорожного покрытия. Эта вода может поступать с боков или под конструкцией покрытия в районах с высокими уровнями грунтовых вод, или она может проникать в основание покрытия через его поверхность, когда выпадают осадки. Портландцементный бетон (РСС) и плотный субстрат практически непроницаемы, но их невозможно положить без швов или трещин. Исследования, которые представили Ridgeway (1976) и Moulton (1991), дают информацию о степени инфильтрации через швы дорожного покрытия или трещины.

7.4.2.1. Инфильтрация воды через дорожное покрытие РСС

Ridgeway (1976) предложил следующую формулу для оценки степени инфильтрации через дорожное покрытие РСС и основной слой:

$$Q = 0,1 [N + 1 + (W/s)] \quad (7.18)$$

где Q – количество проникновения (фут³/ч/погонный фут дорожного покрытия); 0,1 – скорость инфильтрации (фут³/ч/фут трещины); N – количество полос движения; W – ширина дорожного покрытия (футы); s – длина плиты РСС (футы).

7.4.2.2. Проникновение воды через базовый курс

$$Q = 0,2 [N + 1 + (W/40)] \quad (7.19)$$

где 40 – это среднее расстояние между поперечными трещинами (футы). Другие обозначения такие же, как в уравнении 7.18.

Уравнения 7.18 и 7.19 основаны на наблюдениях, собранных на автомагистралях Коннектикута. Они могут быть применимы в ряде областей, но не в таких, где скорость проникновения или расстояние между трещинами различны.

7.4.2.3. Проникновение воды через твердое и гибкое покрытие

Moulton (1991) предложил единую формулу расчета скорости проникновения как для бетонных и асфальтовых покрытий, так и для основного слоя:

$$q_i = I_c (N_c/W + W_c/WC_s) + k_p \quad (7.20)$$

где q_i – расчетная скорость инфильтрации (фут³/день/футы² дренажного слоя); I_c – скорость проникновения в трещину (фут³/день/футы трещины); N_c – количество продольных швов или трещин на жестких или гибких покрытиях; W_c – длина способствующих поперечным трещинам или стыкам (футы); W – ширина совокупного основания или основания, подвергаемого инфильтрации (футы); C_s – расстояние между поперечными трещинами или соединениями (футы); k_p –

скорость инфильтрации (равна коэффициенту проницаемости) через неповрежденную поверхность покрытия.

Пример 7.1

Инфильтрация в жестком участке дорожного покрытия (по Moulton, 1991).

Решение

Рассмотрим новое покрытие РСС, состоящее из двух полос шириной 12 футов с плотно градуированными бетонными плечами шириной 10 футов. Поперечные стыки дорожного покрытия размещаются с интервалом в 20 футов. Предполагается, что инфильтрация через неповрежденную поверхность дорожного покрытия незначительна, то есть $k_p = 0$. Используем уравнение 7.20:

$$I_c = 2,4 \text{ CFD} / \text{фут}$$

$$N_c = (N + 1) = 3$$

$$N = \text{количество полос} = 2$$

$$C_s = 20 \text{ футов}$$

$$W_c = 44 \text{ фута}$$

$$W = 44 \text{ фута, это дает:}$$

$$q_i = \text{расчетная скорость проникновения}$$

$$= 2,4 (3/24 + 44/44 (20))$$

$$= 0,42 \text{ CFD} / \text{SF}$$

В Примере 7.1 делается консервативное предположение, что на плечах асфальтобетона имеются поперечные термически вызванные трещины с теми же интервалами, что и у стыков дорожного покрытия.

Характеристики инфильтрации воды через естественную почву или насыпную почву важны для анализа устойчивости склона. Дальнейшее обсуждение этого аспекта будет представлено в разделе 16.5.

7.4.3. Перколяция и удержание

Перколяция – это движение воды в почвенной массе. Перколяция и инфильтрация тесно связаны, но инфильтрация не может продолжаться беспрепятственно, если перколяция не обеспечивает достаточно места, такого как пустоты в поверхностном слое для инфильтрированной воды.

Удержание является частью процесса движения воды в почвенно-водной системе. Оно тесно связано с осадками, сухопутным стоком, межтоковыми потоками и потоками подземных вод. De Wiest (1965) указал, что часть дождя падает прямо в канал потока и рассматривается как канал осадков. Первоначально почти вся дождевая вода собирается на земле из-за удержания поверхности, суммы перехвата, накопления депрессии и испарения. Позже почва на поверхности становится более насыщенной и больше воды проникает в почву. Наконец, возникает избыток воды, появляется поверхностный сток.

Удержание воды в почвах с промежуточной текстурой частично обусловлено силами набухания и частично капиллярными силами, как пишут Yong и Warkentin (1966). Минералогические аспекты и объяснения характеристик водоудержания дал Low (1968). Поскольку характеристики удержания почвы являются важным контролирующим фактором для взаимодействия почвы и воды в окружающей среде, многие исследователи провели дополнительные исследования. Yong и соавторы (1969) сообщили о влиянии температуры на задержку воды и давление набухания глинистых почв. Наблюдается, что повышенные температуры вызывают повышенное давление набухания и пониженные значения удержания

капиллярной воды в экспериментах, где активен только один из компонентов. Однако там, где два компонента существуют вместе, две противоположные тенденции вызывают различные эффекты при изменениях температуры. Gupta и Larson (1979) разработали метод оценки характеристик удержания воды в почве, основанный на распределении частиц по размерам, содержанию органических веществ и удельном весе почвы.

7.5. ЯВЛЕНИЯ МАССОВОГО ПЕРЕНОСА ВО ВЛАЖНЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ ПОЧВАХ

7.5.1. Ползучий поток

Поток через мелкозернистую почвенно-водную систему носит сложный характер. Его понимание требует знаний из других дисциплин, как указано в главах 5 и 6. Учитывая такой медленный поток со сложной природой поровых флюидов, традиционный подход, основанный на законе Дарси, как определено в уравнении 7.7, не всегда может быть применим. Низкоскоростной поток является неустойчивым, неоднородным и иногда прерывистым. Этот тип потока может содержать токсичные или опасные вещества или находится в твердой или газообразной форме. Термин «ползучий поток» ввел Fang (1986) для описания такого поведения. Этот тип потока будет более подробно обсуждаться в следующем разделе этой главы.

7.5.2. Природа порового флюида в почве

Как обсуждалось в разделе 5.3, природная поровая жидкость (вода) обычно содержит различные количества растворенного кислорода, азота и углекислого газа. Эти газы попадают в воду из биосферы или атмосферы и могут образовываться или потребляться в биологических процессах, происходящих в поровой воде. В почвенно-водных системах иногда обнаруживаются и другие газы, включая аммиак (NH_3), хлор (Cl_2), сероводород (H_2S) и газ радон (Rn-222). Кроме того, более высокие концентрации метана (CH_4) могут быть обнаружены в почвенно-водной системе, если поблизости находятся места захоронения отходов или торфяники.

Вода в почвенной системе может одновременно присутствовать в виде пара, жидкости различной вязкости и твердого вещества различной пластичности. За исключением паровой фазы, вода обладает хорошо развитой структурой благодаря своей полярной молекулярной природе, а также под влиянием электрически заряженных поверхностей и ионов в растворе. Поскольку тепловая энергия молекул и ионов водных растворов действует вразрез со структурообразующими факторами, структуры воды и их физические и физико-химические последствия являются термочувствительными, что приводит к огромной сложности и взаимосвязи между всеми физическими и физико-химическими факторами в почвенно-водных системах.

Для оценки системы почва–вода мы должны рассматривать элемент почвы в три этапа: твердое вещество, жидкость и газ. Ввиду разнообразных свойств водной субстанции и изменений в почвенной среде, вода в почве реагирует на наложение какого-либо энергетического градиента, будь то механический (закон Дарси), тепловой, электрический, магнитный или какой-либо другой, и проявляет эффекты связи, указывающие на возмущение других энергетических полей. Такая

реакция обычно приводит к явлению массопереноса; следовательно, поток через пористую, влажную систему – это не просто гидравлическая проводимость, как это описано в законе Дарси, широко используемом в инженерной геотехнике. Сравнение гидропроводности и явлений массопереноса для почв и поровых давлений, возникающих в процессе массопереноса в почвенно-водных системах, представлено в таблицах 7.4 и 7.5. Кроме того, гидравлическая проводимость для данного грунта не является постоянной, поскольку она будет меняться при изменении условий окружающей среды. Для изучения явлений массового переноса в системе почва–вода необходимы экспериментальные данные; следовательно, необходим новый прибор для измерения проводимости движения воды при воздействии различных энергий.

Таблица 7.4. Гидропроводность в сравнении с явлениями массопереноса в почвенно-водной системе

Явления массового переноса	
Гидравлическая проводимость	Механическое энергетическое поле
Из-за механического (гидростатического) потенциала	
Энергетическая проводимость (экологическая)	Энергетические поля многих сред
Гидратация энергии	
За счет энергии гидратации ионов, связанной с теплотой смачивания	
Осмотическая энергия	
Из-за осмотической энергии ионов либо удерживается в некотором равновесии Доннана на поверхности твердых частиц, либо свободна в водном растворе	↓
Капиллярный потенциал	
Из-за поверхностного натяжения воды и размера и геометрии пор почвы	
Электрический потенциал	
Электроосмос; электрокинетические явления	
Тепловой потенциал	
Термоосмос: термоэлектрический эффект	
Магнитный потенциал	
Электромагнитная сила	
Потенциал давления пара	

Таблица 7.5. Поровое давление, создаваемое в процессе массопереноса в почвенно-водной системе

Механическое (гидростатическое) давление ¹	Механическое энергетическое поле
Экологическое давление	Мультимедийное энергетическое поле
Давление, создаваемое теплом смачивания	
Давление, создаваемое кинетической дисперсионной силой	↓
Электродвижущая сила (ЭДС)	
ЭДС, полученная из термоэлектрического эффекта	
ЭДС, созданная из электроэлектрической силы	
Сила водяного пара	

¹ Поровое давление (u), обычно используемое в геотехнической инженерии для вычисления эффективного напряжения (σ).

Давление обусловлено только гидростатическим напором: $u = h\gamma_w$, где u – поровое давление, h – гидростатический напор, γ_w – удельный вес воды.

7.5.3. Сопряженный поток

7.5.3.1. Общее обсуждение

Экспериментальные и теоретические результаты показывают, что вода может вытекать через почву из-за наложенного градиента. Чтобы описать явления массопереноса с этими различными градиентами, общее выражение, подобное уравнению закона Дарси, можно сформулировать так:

$$v = -k_h \frac{\partial h}{\partial L} - k_T \frac{\partial T}{\partial L} - D \frac{\partial c}{\partial L} - \sigma_\epsilon \frac{\partial V}{\partial L} \quad (7.21)$$

где

v – скорость потока

k , D , σ_ϵ – коэффициенты пропорциональности

h – гидравлическая головка

T – температура

c – химическая концентрация

V – напряжение

Краткое описание четырех типов прямого потока через почвенную массу представлено в таблице 7.6. Уравнение 7.21 можно упростить следующим образом:

$$\Psi_\epsilon = K_\epsilon I_\epsilon \quad (7.22)$$

где Ψ_ϵ – скорость потока в энергетических полях; K_ϵ – коэффициент теплопроводности; I_ϵ – градиент энергии.

Поскольку поток через мелкозернистую систему почва–вода – это не просто гидравлическая проводимость, как описано в законе Дарси, термины «градиент энергии» и «энергетическая проводимость» (Fang, 1992a, 1994c) введены для замены гидравлического градиента и гидравлической проводимости, обычно используемых в инженерной геотехнике. Уравнение 7.22 можно назвать «уравнением удельной электропроводности». Коэффициент удельной электропроводности, показанный в уравнении 7.22, должен быть определен экспериментально. Исходя из закона сохранения энергии, этот коэффициент для данного материала в изолированной системе должен оставаться постоянным при любых условиях окружающей среды.

7.5.3.2. Измерения проводимости почвы

Важность движения воды в мелкозернистой почве, вызванная тепловым или электрическим потенциалом, обсуждалась многими исследователями (Winterkorn, 1955; Mitchell, 1993). В последнее время из-за строительства системы контроля опасных или токсичных отходов эта проблема привлекла дополнительное

внимание. Простой прибор для измерения удельной электропроводности в почвенной массе разработал Fang (1997).

1. Это переносное устройство, панель управления которого имеет размеры примерно 20×20 дюймов. Размер образца почвы, использованного в эксперименте, составляет 5×1 ½ дюйма.

2. Две ячейки соединены на концах образца почвы с целью контроля электрической энергии.

3. Магнитная энергия создается путем использования двух электрических токов, пересекающих друг друга, создавая временную электромагнитную силу в непосредственной близости от электрических зарядов (рисунок 9.28).

4. Тепловая энергия вырабатывается через нагревательные элементы. Этот аппарат может быть использован для демонстрации явлений термоосмоса и электроосмоса, а также термоэлектрического эффекта в аудитории в целях обучения. Экспериментальные данные, полученные в результате таких испытаний, могут быть полезны для анализа и проектирования объектов контроля и хранения опасных или токсичных отходов. Кроме того, уникальной особенностью устройства является то, что оно может также использоваться для дезактивации почвы и удаления тяжелых металлов, захваченных в системе почва–вода (раздел 9.13).

Таблица 7.6. Краткие данные, касающиеся четырех типов прямого потока через почвенную массу.

Тип потока	Проводимость	Градиент	Скорость потока	Закон о контроле
Водяной	Гидравлическая k_h	$i_h = \Delta h/T$	$q_h = k_h i_h A$	Дарси
Тепловой	Термальная k_T	$i_T = \Delta T/L$	$q_T = k_T i_T A$	Фурье
Электрический	Электрическая σ_e	$i_e = \Delta V/L$	$I = \sigma_e i_e A$	Ома
Химический	Диффузионная D	$i_c = \Delta c/L$	$J_d = D i_c A$	Фика

Примечание: A – площадь поперечного сечения; L – длина пути потока.

7.6. ОСМОС И ОБРАТНЫЙ ОСМОС

7.6.1. Явления осмоса

7.6.1.1. Общее обсуждение

Осмоз – это явление, включающее растворы, разделенные мембраной. Мембрана действует как барьер между растворами и обладает свойством пропускать определенные типы молекул, в то же время предотвращая проникновение молекул других типов в раствор. С инженерной точки зрения, когда концентрация раствора в одной точке отличается от концентрации в другой точке, существует тенденция к диффузии более разбавленной жидкости в область более высокой концентрации. Классическая демонстрация осмотических явлений из базовой физики проводится с помощью U-образной трубы, как показано на рисунке 7.14, в которой установлена полупроницаемая мембрана для отделения U-образной трубы, как показано вертикальной пунктирной линией. Если солевой

раствор находится на правой стороне мембраны, а чистая вода размещена на левой стороне, то чистая вода попадет в раствор, пройдя через мембрану (вертикальная пунктирная линия). Движение растворенного вещества в противоположном направлении тормозится мембраной. На это одностороннее движение указывает отчетливое понижение уровня чистой воды и соответствующее повышение уровня раствора. Эта простая демонстрация называется классическим осмотическим явлением.

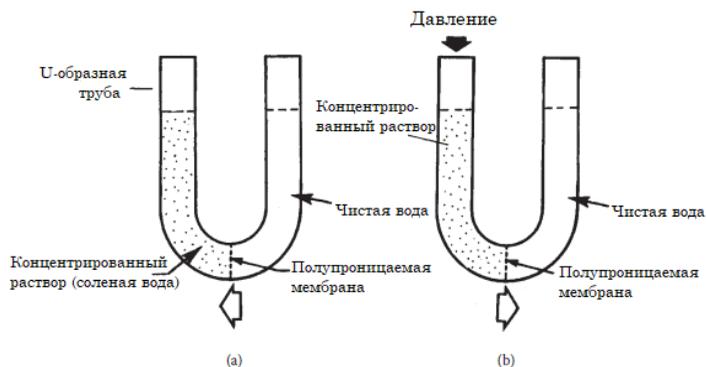


Рисунок 7.14. Демонстрация явлений осмоса: (а) типичный осмос и (б) обратный осмос.

7.6.1.2. Осмотические мембраны и осмотические давления

1. *Полупроницаемая мембрана и осмотическая мембрана.* Как обсуждалось в предыдущем разделе, имеются признаки того, что осмос представляет собой явление, относящееся к растворам, разделенным мембраной (рисунок 7.14а). Мембрана действует как барьер между растворами и обладает свойствами, позволяющими проходить определенным типам молекул, в то же время предотвращая проникновение других частиц в раствор. Такая мембрана называется полупроницаемой мембраной. Полупроницаемые мембраны, которые обеспечивают прохождение растворителя, но не растворенного вещества, называются осмотическими мембранами.

2. *Осмотическое давление.* Как показано на рисунке 7.14b, осмос может быть остановлен, если на мембрану со стороны раствора воздействует противоположное давление или сила. Это давление называется осмотическим давлением. Чистая вода имеет нулевое осмотическое давление. Любые растворенные нелетучие вещества повышают осмотическое давление. Два раствора, которые имеют одинаковое осмотическое давление, называются изотоническими растворами.

7.6.2. Осмотическое давление в почвах

7.6.2.1. Осмотическое течение в почвах

Осмотические явления могут быть использованы для объяснения определенных характеристик в мелкозернистой почве, как пишет Nough (1957). Твердые частицы в мелкозернистых почвах несут отрицательный электрический заряд. Хотя это связано с адсорбцией, это также приводит к привлечению на

поверхность частицы ряда положительно заряженных атомов (ионов) диссоциированных минералов, которые находятся в растворе в окружающей поровой воде. Фиксированное количество зарядов, обеспечиваемых этими ионами, всегда должно оставаться вблизи данной глиняной частицы, чтобы обеспечить электрический баланс. Однако по отдельности эти ионы могут обмениваться местами с другими, существующими или вводимыми в систему глина–вода.

7.6.2.2. Осмотическое отталкивающее давление в почвах

Ladd (1960) использовал осмотическое отталкивающее давление для объяснения механизмов набухания уплотненной глины. Осмотические давления могут действовать в глине, поскольку:

- 1) существуют различия в концентрациях растворенного вещества (в этом случае ионы являются растворенным веществом);
- 2) электрическое поле вокруг отрицательно заряженных частиц глины действует как полупроницаемая мембрана.

Сочетая осмотические явления и концепцию электрического двойного слоя, Ladd предложил механизм набухания почвы, показанный на рисунке 7.15. В этом случае единственными ионами в двойном слое будут обменные катионы. Из-за способных к обмену катионов концентрация ионов в двухслойной воде больше, чем концентрация ионов в свободной воде. Обмениваемые катионы притягиваются к частицам глины отрицательным электрическим полем, возникающим из-за отрицательного заряда на поверхности частиц почвы.

Электрическое поле действует как полупроницаемая мембрана в том смысле, что оно позволяет воде проникать в двойной слой, но не позволяет обменным катионам покинуть двойной слой. Можно видеть, что из-за разницы в концентрациях ионов между точками *a* и *b* вода хотела бы течь из *b* в *a*, и для предотвращения увеличения межчастичного расстояния, то есть набухания, требуется эффективное напряжение. Если эффективное напряжение уменьшается, то вода течет из *b* в *a*, уменьшая тем самым концентрацию ионов в *a*. Тогда двойной слой будет расширяться до тех пор, пока соответственно более низкое осмотическое давление снова не будет в равновесии с эффективным давлением.



Рисунок 7.15. Осмотическое давление между двумя глинистыми частицами, погруженными в воду (по Ladd, С. С. [1960], Mechanisms of Swelling by Compacted Clay, HRB Bulletin 265, pp. 10–26. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не подлежит защите авторских прав).

7.6.3. Явление обратного осмоса

Как показано на рис. 7.14а, осмос – это самопроизвольное прохождение жидкости из разбавленного в более концентрированный раствор через идеальную полупроницаемую мембрану, которая позволяет проходить жидкости, но не растворенным твердым веществам. Обратный осмос является противоположным процессом, в котором естественный осмотический поток меняется на обратный, как показано на рисунке 7.14б. Величина давления, приложенного к концентрированному раствору, является достаточной для преодоления естественного осмотического давления менее концентрированного раствора.

Система обратного осмоса является относительно новой по сравнению с естественным осмосом, как обсуждалось ранее. Однако данный феномен не выходит за пределы лабораторий. Многие возможности применения обратного осмоса в области экологического инжиниринга были обсуждены Buckley (1975). Были изучены другие области применения в геотехнологии окружающей среды, включая (1) опреснение морской воды, (2) разделение нефти и воды, (3) очистку сточных вод и (4) дезактивацию почвы.

7.7. ВСАСЫВАЮЩЕЕ ДАВЛЕНИЕ ПОЧВЕННОЙ ВЛАГИ И ДИФФУЗИВНОСТЬ

7.7.1. Всасывающее давление почвенной влаги

Термин «всасывающее давление почвенной влаги» был введен Букингом в 1907 году на основе работы Бриггса в 1897 году и введен в геотехническую инженерию Шофилдом (1935). Значение всасывающего давления и методов его измерения было установлено Крони и Колманом в 1954 году в Исследовательской лаборатории дорог в Лондоне. После Международной конференции по поровому давлению и всасыванию в почве (ICE, 1961) эта концепция была хорошо принята геотехниками и дорожными инженерами.

Поровая вода в естественных и уплотненных почвах часто находится в состоянии напряжения, то есть ее давление отрицательно по отношению к атмосферным условиям. Это отрицательное давление называется всасыванием. Разработано множество устройств, способных измерять всасывание: керамические блоки сопротивления, измерители натяжения, прижимные пластины, измерители осмотического натяжения и психрометры с термопарами. Эти устройства описывали Fredlund и Rahardjo (1993) и другие. Единица для всасывания почвы и воды называется r_f . Всасывание по шкале r_f равно логарифму с основанием десять, выраженным в сантиметрах воды. Таким образом, 10 см воды равны $r_f 1$, 1000 см равны $r_f 3$ (примерно 1 атм). Почва, находящаяся в равновесии со свободной водой, имеет $r_f 0$, а высушенная в печи – почти $r_f 7$.

Согласно Crouney и Coleman (1961), различие между всасыванием почвы и отрицательным давлением в поровой воде можно объяснить следующим уравнением:

$$u = s + (\alpha) p \quad (7.23)$$

где u – отрицательное давление воды в порах; s – всасывание грунтовой воды; α – изменение отрицательного давления воды в порах с постоянным содержанием влаги; p – приложенное давление.

Значение α может быть измерено непосредственно с помощью простого нагрузочного теста с образцом с известной величиной всасывания. Уравнение 7.23 можно использовать для оценки предельного распределения влаги под дорожным покрытием и конструкциями на насыщенных и ненасыщенных грунтах. Как указывает Организация экономического сотрудничества и развития (McRoberts и Nixon, 1975), свойства почвенно-водных систем должны быть известны, чтобы прогнозировать и контролировать содержание влаги и ее движение в грунтовых почвах. Elzeftawy и Dempsey (1976) указали, что абсолютная величина изменения модуля упругости, вызванного увеличением содержания влаги в почве, не будет постоянной для всех типов почвы, но будет варьироваться в зависимости от сопутствующего изменения всасывающего давления почвенной влаги.

7.7.2. Диффузивность системы почва–вода

7.7.2.1. Общее обсуждение

Концепция диффузии системы почва–вода была введена в геотехническую инженерию Чайлдсом и Коллис-Джорджем в 1950 году. Их теория для потока воды в ненасыщенной почве предполагает, что закон Дарси может быть записан как уравнение потока воды диффузионного типа в однородных почвах, где градиенты содержания воды, а не градиенты общего потенциала выражаются следующим образом:

$$q = D \dot{\omega} - k \quad (7.24)$$

где q – содержание почвы в потоке воды по объему; k = гидравлическая проводимость почвы (функция содержания воды в почве); D – коэффициент диффузии почвы и воды (функция содержания почвы и воды); $\dot{\omega}$ – градиент содержания воды.

Диффузионность системы почва–вода (D) равна:

$$D = k/C \quad (7.25)$$

где C – удельная емкость хранения почвы и воды = $\partial\omega/\partial h$, где h – напор почвы и воды под давлением (всасывание).

Параметры k , ω и h в уравнении 7.25 могут быть определены экспериментально, как описали Elzeftawy и Dempsey (1976) и Fredlund и Rahardjo (1993).

7.7.2.2. Полевые измерения

В полевых условиях уровень грунтовых вод устанавливается в нижней части уплотненного столба грунта, и движение воды через почву может быть измерено в изотермических условиях. Гамма-метод может быть использован для неразрушающего (NDT) измерения содержания воды и установки датчика давления натяжного устройства для измерения давления в системе почва–вода. На основе этих данных можно оценить параметры ненасыщенной гидравлической проводимости (Hamilton и соавторы, 1981), коэффициент диффузии и характеристики системы почва–вода, чтобы предсказать движение влаги через ненасыщенные грунтовые почвы (вадозная зона). Некоторые типичные соотношения содержания почвы и воды к всасыванию и диффузионной способности для глины, суглинка, супеси и илистой глины представлены на рисунке 7.16 (а и б). На рисунке 7.17 показана взаимосвязь между диффузионной способностью, всасыванием и содержанием воды в илистой глине. В обоих

случаях, когда содержание воды увеличивается, увеличивается и коэффициент диффузии, и величина всасывания. Влияние глубины на степень насыщения, связанное с всасыванием уплотненного вулканического пепла, показано на рисунке 7.18. Уменьшение насыщенности почвы приводит к увеличению значений рF.

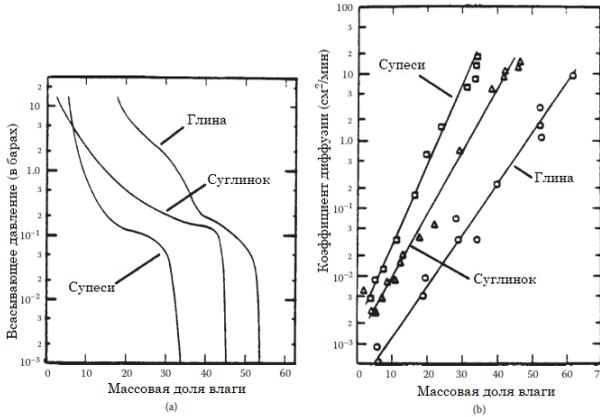


Рисунок 7.16. Всасывание и коэффициент диффузии почвы в зависимости от содержания воды: (а) всасывание почвы и (б) коэффициент диффузии (по Gardner, W. R. [1958], Mathematics of Isothermal Water Conduction in Unsaturated Soil, HRB Special Report 40, pp. 78–87. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не подлежит авторскому праву защита).

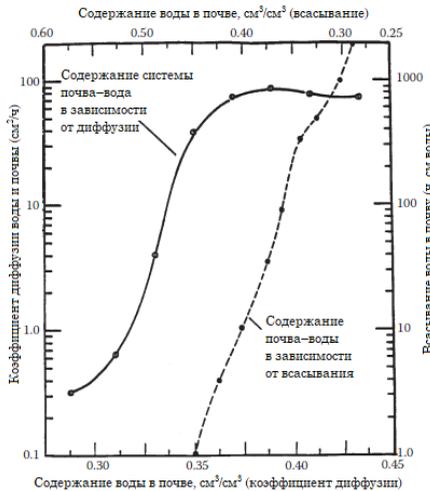


Рисунок 7.17. Зависимость содержания системы почва–вода от всасывания системы почва–вода и диффузии системы почва–вода для илистой глины (по Elzeftawy and Dempsey [1976], Unsaturated transient and steady-state flow of moisture in subgrade soil, TRR 612, pp. 56–61. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в общественном достоянии и не подлежит обсуждению на защиту авторских прав).

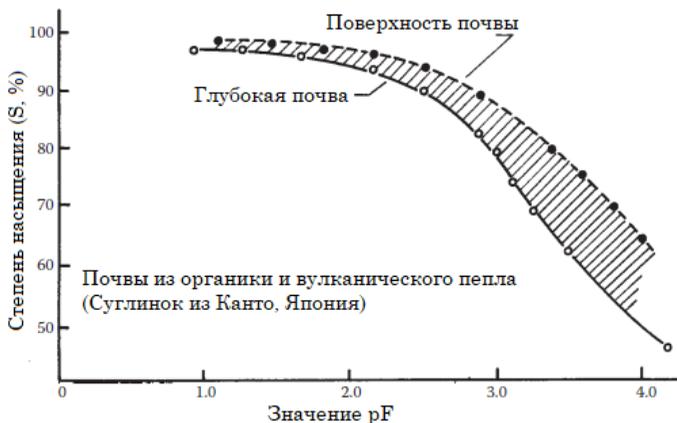


Рисунок 7.18. Влияние глубины на степень насыщенности, отраженное на значениях рF (по Yasuhara and Takenaka, [1977], T. Yamanouchi, ed., Engineering Problems of Organic Soils in Japan, JSSMFE, Tokyo. pp. 49–67)

7.8. МИГРАЦИЯ ВЛАГИ

7.8.1. Характеристика миграции влаги

Миграционные явления в почве являются частью динамического поведения почвенного движения влаги. Динамическое равновесие между водой в различных состояниях, в отдельных молекулах воды, будет проходить назад и вперед со стабилизированными скоростями между состояниями пара и жидкости, между слоями капиллярной и гигроскопической воды. Кроме того, в объеме почвы при однородной температуре молекулы воды в различных состояниях будут диффундировать назад и вперед из одного места в другое. Имея в виду эту сложную динамичную картину, требуется немного воображения, чтобы понять, что, когда уровень температуры изменяется в одном месте, упомянутые выше равновесия нарушаются и происходит перераспределение воды, как между несколькими состояниями, так и между точками, находящимися при различных температурах. Затем будут установлены новые условия равновесия с содержанием влаги в холодном месте, превышающем содержание в теплом. В таких условиях окружающей среды это перераспределение является тем, что можно назвать миграцией влаги при тепловых градиентах. Причины миграции могут быть механическими, термическими, электрическими и магнитными. На основании вышеупомянутого описания миграции влаги следует отметить следующие два момента:

- 1) миграция – это временное перераспределение воды, а не постоянный поток;
- 2) вода в любом из состояний, в котором она существует в почве, может мигрировать туда-сюда, если меняются местные условия окружающей среды (рисунок 7.19).



Рисунок 7.19. Верхние и нижние ограничения для миграции влаги в капиллярной зоне (данные из: Lassen, L., Lull, H. W. and Frank, B. [1952], Some plant–soil–water relations in watershed management, Circular 910, USDA, Washington, D.C.)

7.8.2. Пределы миграции влаги

Когда величина миграции изучается как функция исходного однородного содержания влаги в почве, обнаруживается, что явление заметно только в диапазоне содержания влаги, ограниченном двумя различными пределами, между которыми оно проходит через четко определенные пределы:

- 1) нижний предел миграции влаги находится около гигроскопического коэффициента, максимальный – около коэффициента увядания;
- 2) верхний предел миграции влаги составляет примерно полевую емкость.

Эти нижние и верхние пределы определяют диапазон капиллярной воды. Соотношение показано на рисунке 7.19. Используемые здесь термины, такие как коэффициент увядания, полевая способность и другие значения влажности, поясняются на рисунке 5.1. Верхние и нижние ограничения для незагрязненной воды, предложенные Lassen и соавторами (1952), указаны на рисунке, однако для загрязненной воды диапазон расширяется.

7.8.3. Факторы, влияющие на миграцию влаги в почвах

7.8.3.1. Возможные варианты

Многочисленные исследователи изучили причины и факторы, влияющие на миграцию влаги в почвах. Jumikis (1958) сообщил о возможных режимах, влияющих на миграцию влаги, как показано на рисунке 7.20. Дерягин и Мелникова (1958) сообщили о явлениях миграции, отраженных в виде термокапиллярного потока в зависимости от содержания влаги в почве. Значительно разные результаты получены для суглинка и супеси, как показано на рисунке 7.21.

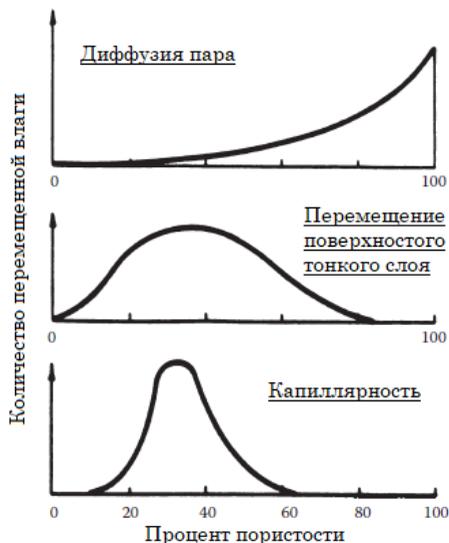


Рисунок 7.20. Возможные варианты миграции влаги (по Jumikis [1958], HRB Special Report 40, pp. 178–190. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не защищен авторскими правам).

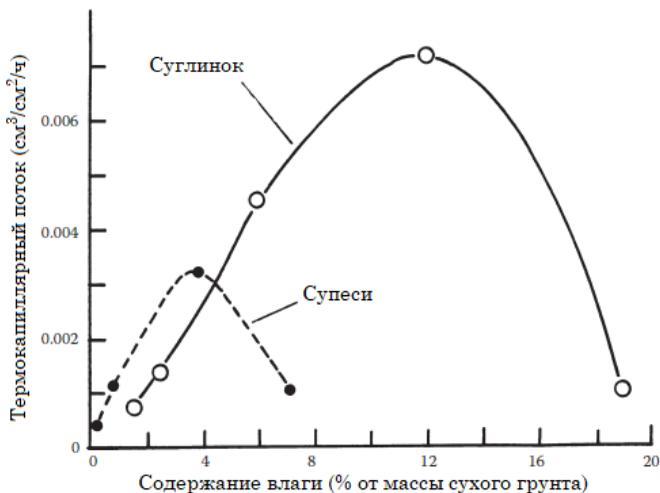


Рисунок 7.21. Миграция влаги, отраженная как термокапиллярный поток, как функция содержания влаги (по Derjaguin and Melnikova [1958], HRB Special Report 40, pp. 43–54. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не подлежит защите авторских прав).

7.8.3.2. Пористость и удельная поверхность

Общеизвестно, что пористость вместе с соответствующей удельной площадью поверхности оказывают важное влияние на величину и скорость миграции и,

видимому, на режим, в котором она происходит. Непрерывные пленки влаги необходимы для установления и поддержания миграции жидкости независимо от предполагаемого механизма. Почвы с высокой пористостью и сравнительно небольшой удельной поверхностью, такие как пески, имеют гораздо более высокие коэффициенты диффузии пара, чем менее проницаемые глинистые почвы. Jumikis (1958) проиллюстрировал диапазоны пористости, в которых могут быть эффективны различные способы миграции влаги.

7.8.3.3. Структура почвы

Структура почвы также важна. Smith (1943) показал, что при фрагментации почв величина миграции заметно возрастает по сравнению со значениями, наблюдаемыми для тех же почв в их естественном, структурированном состоянии. Для слегка зернистого А-горизонта изученных почв увеличенное значение составило 127 % от исходного значения; для более структурированных В- и С-горизонтов увеличенные значения составили 443 % и 240 % соответственно. Другие факторы влияют на миграцию, включая ионный обмен, выщелачивание и адсорбцию.

7.9. ЯВЛЕНИЕ ДИФфуЗИИ

7.9.1. Общее обсуждение

Диффузия – это процесс, при котором ионные или молекулярные частицы движутся в направлении градиента их концентрации под воздействием их кинетической энергии. Процесс диффузии часто называют самодиффузией, молекулярной диффузией или ионной диффузией. В геотехнической инженерии это называется феноменом переноса химических веществ. Масса диффузионного вещества, проходящего через данное поперечное сечение в единицу времени, пропорциональна градиенту концентрации. Это утверждение известно как первый закон Фика. Это может быть выражено следующим образом:

$$F = -D \, dC/dx \quad (7.26)$$

где F – массовый поток; D – коэффициент диффузии; C – концентрация растворенного вещества; dC/dx = градиент концентрации, который является отрицательной величиной в направлении диффузии.

Коэффициенты диффузии зависят от температуры. В подземных водах диапазон коэффициентов диффузии составляет от 1×10 до 2×10 м/с при 25°C . Если почвенно-водная система загрязнена, диапазоны коэффициентов резко изменяются.

7.9.2. Диффузионные явления в системе почва–вода

Диффузия и миграция тесно связаны в системе почва–вода, как показано на рисунке 7.22. Теория диффузии была применена многочисленными исследователями для оценки движения опасных и токсичных отходов в системе

почва–вода. Tuncan и соавторы (1989) разработали лабораторное оборудование для измерения поведения почвы при сопряженном воздействии термохимических потенциалов. Asar и Haider (1990) изучали перенос загрязняющих веществ низкой концентрации в насыщенных земных барьерах. Benson и Charbeneau (1991) использовали теорию диффузии, чтобы предсказать время первого прохождения через изоляционное покрытие полигона.

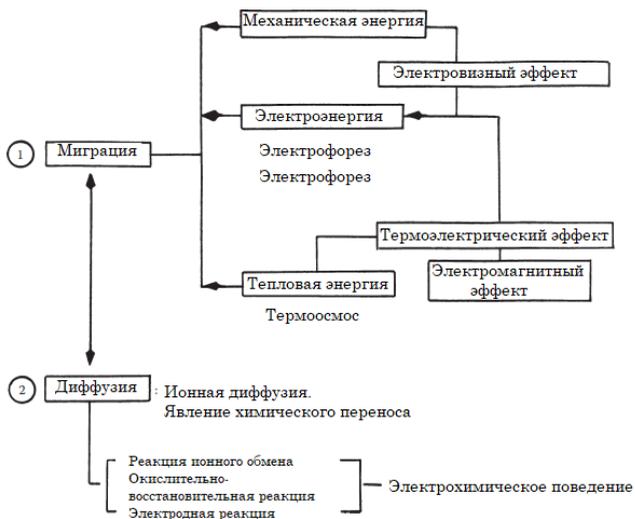


Рисунок 7.22. Взаимосвязь диффузионных и миграционных характеристик в почвенно-водных системах.

7.10. ДВИЖЕНИЕ В ВОДНОЙ ЗОНЕ

Явления движения воды в вадозной зоне (ненасыщенной зоне) мелкозернистой почвы аналогичны явлениям массопереноса и электропроводности почвы, которые обсуждались в разделах 7.5 и 7.6. На рисунке 7.23 представлены типы потоков и их характеристики в почвенно-водных системах. Движение воды в вадозной зоне является сложным, особенно в загрязненных районах. Дальнейшее обсуждение будет представлено в разделе 17.6. Рисунок 7.24 иллюстрирует движение воды в ненасыщенной лессовой почве. При рассмотрении рисунка 7.24, существуют большие различия в расстоянии между точками *a* и *b* под влиянием захваченного пузырька воздуха и поведения набухания в системе почва–вода.

7.11. РЕЗЮМЕ

1. Обсуждаются капиллярный подъем, гидравлическая, тепловая и электрическая проводимость почв, а также основные понятия каждого аспекта.

2. Почва состоит из электрически отрицательных минеральных поверхностей, а вода состоит из электрических диполей и преимущественно положительно заряженных ионов. Взаимодействие почва–вода–среда представляет собой

явление массового переноса, а не просто контролируется гидравлической проводимостью, как описано в законе Дарси.

3. Некоторые ограниченные экспериментальные данные используются для иллюстрации явлений массового переноса загрязненной ненасыщенной мелкозернистой почвы.

4. Представлено общее уравнение для оценки электропроводности почвы. Разработан простой прибор для измерения такой проводимости.

5. Миграционные явления почвы являются частью динамического поведения движения влаги в почве. Миграция – это временное перераспределение воды, а не продолжающийся поток, и влага в почве может мигрировать с места на место, если местные условия окружающей среды изменяются.

6. Диффузия – это процесс, при котором ионные или молекулярные частицы движутся в направлении градиента их концентрации под воздействием их кинетической энергии. Масса диффузионного вещества, проходящего через данное поперечное сечение в единицу времени, пропорциональна градиенту концентрации.



Рисунок 7.23. Типы течения и их характеристики в почвенно-водных системах.

ЛЕСС

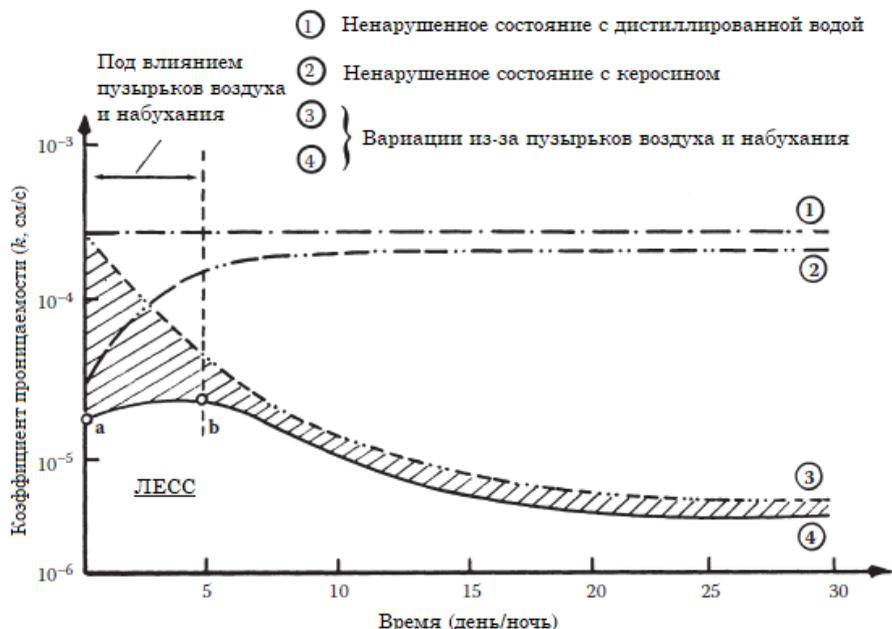


Рисунок 7.24. Коэффициент зависимости проницаемости от времени (данные из: CAS [1961], Research on Loess, Civil Engineering Research Report № 13, Chinese Academy of Science, Beijing, 157 p.).

ПРОБЛЕМАТИКА

7.1. Из уравнения 7.1 определяется подъем воды в капиллярной трубке, а из уравнения 7.2 – капиллярный подъем, связанный с эффективным размером (D_{10}) частиц почвы. Какова максимальная высота капиллярного подъема воды в материале с однородным диаметром пор 0,0001 см?

7.2. Как высоко поднимется метиловый спирт в стеклянной трубке диаметром 0,1 мм с поверхностным натяжением 23 дин/см и удельным весом 0,8?

7.3. Во время испытания на проницаемость с постоянным напором часть хвостовой воды испаряется. Как это влияет на значение коэффициента проницаемости (k)? Объясните это. Если во время испытания на проницаемость для падающего напора воздух задерживается в образце почвы, увеличится ли или уменьшится коэффициент проницаемости k для глинистого грунта?

7.4. Образец почвы диаметром 10 см и толщиной 5 см испытывали в пермеатре с падающим напором. Напор опустился с 45 до 30 см за 4 мин и 32 с. Площадь стояка составляла 0,5 см². а) Каким был капиллярный подъем воды в стояке? (б) Учитывая влияние капиллярного подъема в стояке, рассчитайте коэффициент проницаемости почвы в единицах см/с. (с) Образец почвы представлял собой материал, имеющий удельный вес твердых веществ, равный

2,67, и образец весил 617 г в сухом состоянии. Вычислите среднюю скорость просачивания.

7.5. Горизонтальный слоистый слой песка толщиной 12 футов разбит на две равные части слоем ила толщиной 2 фута. Коэффициент проницаемости (k) в вертикальном направлении песка составляет 2×10^{-2} фут/с, а коэффициент проницаемости в том же направлении слоя ила – 3×10^{-4} фут/с. Установите значение среднего k в вертикальном направлении для этого стратифицированного слоя.

7.6. Обсудите влияние неорганической и органической проницаемости на проницаемость глиняных вкладышей. Почему выщелачивание вызывает изменения проницаемости?

7.7. Почва имеет удельный вес $17,1 \text{ кН/м}^3$ и содержание воды 6 %. Сколько воды в галлонах следует добавить в каждый кубический ярд почвы, чтобы поднять содержание воды до 12,5 %? (Предположим, что коэффициент пустот остается постоянным.)

7.8. Почва [A] помещается поверх почвы [B] в пермеаметровой трубке с постоянным напором. Удельные массы и пустотность этих почв составляют: $G_s [A] = 2,65$, $G_s [B] = 2,69$; $e_A = 0,60$, $e_B = 0,69$. Высота образца для обеих почв составляет 40 см. Гидравлический напор от нижней части почвы до верхней части резервуара для воды составляет 120 см. Учитывая, что 25 % гидравлического напора теряется восходящим потоком через грунт [B], рассчитайте критический гидравлический градиент, при котором возникает нестабильность.

8. Тепловые свойства почв

8.1. Введение

Тепловые изменения в почвах оказывают большое влияние на несколько областей техники. Несколько примеров этого явления: (1) потеря и восстановление несущей способности под воздействием оттаивания; (2) прогноз температуры дорожного покрытия, которая влияет на стабилизацию битумного отверждения поверхности, отверждения бетонных плит, движения влаги в любом типе компонентов дорожного покрытия, насыпей и земляных плотин, глиняных прокладок; (3) рассеяние тепла от подземных электрических кабелей или паровых труб и теплообмен в системах тепловых насосов; (4) теплопроводность в опасных и токсичных хранилищах.

8.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛА И ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА

8.2.1. Характеристики тепла

Теплота – это форма энергии. Теплоемкость на грамм материала называется его удельной теплотой, которая для атомного веса в граммах элемента является атомной теплотой, а для грамма-моль соединения является молекул теплотой. Общее содержание тепла (U) в системе, обладающей теплоемкостью (C_s) и имеющей абсолютную температуру (T), выражается следующим образом:

$$U = \int_0^T C_s dT \quad (8.1)$$

Понятие теплоты как формы движения конечных твердых частиц материи восходит к античной науке. Научное доказательство существенной обоснованности этой концепции в 1798 году представил Rumford и в 1799 году Davu. Экспериментально обнаруженные зависимости между температурой, давлением и объемом нормальных газов привели к концепции «идеального газа». Современная теория удельная теплоемкость газов, которая учитывает электромагнитные явления, в значительной степени развита Альбертом Эйнштейном (1879–1955), тогда как удельная теплоемкость твердых частиц была разработана главным образом Питером Дебая (1884–1966).

8.2.2. Источники тепла

Типы источников тепла, проникающих в грунт, можно назвать в две основные группы: природные и искусственные источники. Природные источники включают солнечные и геотермальные. Искусственные источники охватывают тепло, выделяемое из паровых труб, электрических кабельных линий, систем тепловых насосов, а также из других искусственных источников, полученных из химических и ядерных отходов, сбрасываемых в естественную почву, диоксида

углерода, образующегося на свалках, и заброшенного угля, который иногда вызывает подземные пожары. Некоторые из источников тепла перечислены в таблице 2.10.

8.2.3. Теплообмен у поверхности земли

Тепловой баланс грунта зависит от солнечной энергии, теплообмена, изменения фазы, тепловых потоков и излучения, как описано Гейгером (1965), а также от климата, подповерхностных тепловых условий и различных инженерных особенностей. Реальный теплообмен в дневное и ночное время сильно отличается, как писал Гейгер, исходя из физических и метеорологических концепций. На рисунке 8.1 показан теплообмен и взаимодействие между почвой и теплотой у поверхности земли.

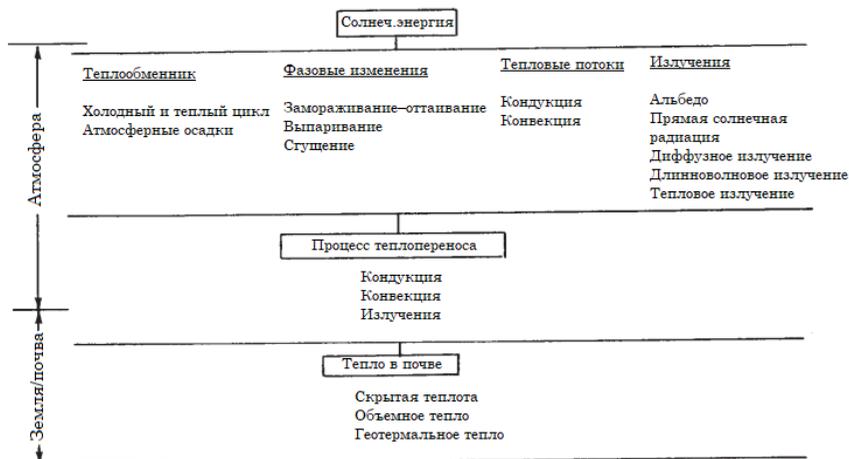


Рисунок 8.1. Взаимодействие почвы–теплоты у поверхности земли.

8.3. ПРОЦЕСС ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛА И ИЗМЕРЯЕМЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ

8.3.1. Процесс теплопередачи

Процесс теплопередачи в системе почва–вода заключается в трех основных процессах переноса: кондукция, конвекция и излучение.

8.3.1.1. Кондукция

Кондукция – это процесс, при котором тепловая энергия передается между молекулами внутри вещества, между двумя веществами, находящимися в физическом контакте или путем прямого молекулярного взаимодействия. Скорость теплового потока или теплопроводность (k) вещества зависит от способности его молекул отдавать и поглощать тепло. В общем, газы (воздух) являются плохими проводниками, но отлично подходят для изоляции. Многие

строительные изоляционные материалы содержат тысячи крошечных воздушных карманов и, следовательно, могут быть полезны в качестве изоляционных материалов. Это также указывает на то, что с геотехнической точки зрения для сухих почв увеличение пористости приводит к увеличению термического удельного сопротивления.

8.3.1.2. Конвекция

Конвекция определяется как передача тепла между поверхностью и движущейся жидкостью или газом или передача тепла при перемещении молекул из одной точки в другую. В конвекционных процессах тепло всегда переходит от теплого к холодному. Чем больше разница температур между двумя веществами, тем больше тепла будет передаваться. В большинстве почв процесс теплопередачи является кондукцией или конвекцией, или и тем, и другим. Рисунок 8.2 иллюстрирует сравнение между кондукцией и конвекцией насыщенных или частично насыщенных почв.

8.3.1.3. Радиационный процесс

Все материалы постоянно излучают тепловую энергию во всех направлениях из-за постоянного колебательного движения молекул, характеризующегося температурой на их поверхности. Количество тепловой энергии, излучаемой материалом, зависит от температуры излучающей поверхности. Эмиссионная способность (E) материала является мерой способности материала испускать тепловое излучение. Например, блестящие металлы являются плохими источниками теплового излучения. Это означает, что они излучают очень мало тепла при данной температуре. Значение E варьируется от 0 до 1,0 для большинства строительных материалов. Не все материалы поглощают тепловое излучение. Некоторые отражают его, а некоторые передают. Способность поверхности отражать или поглощать тепловое излучение будет зависеть главным образом от плотности и состава поверхности, а не от ее цвета. Для почвы, в дополнение к ее плотности и составу, содержание влаги и текстура почвы также сильно влияют на тепловое поведение.

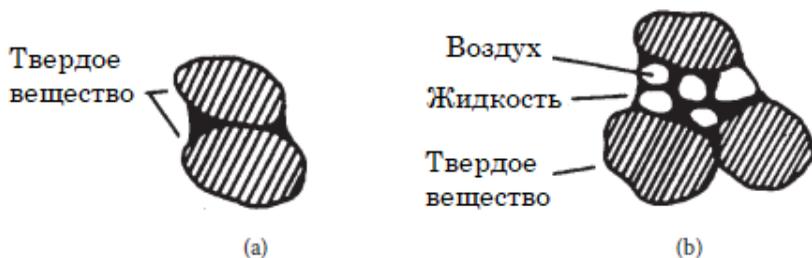


Рисунок 8.2. Сравнение между кондукцией (теплопроводностью) и конвекцией насыщенных или частично насыщенных почв: (а) кондукция – теплопередача за счет прямого контакта между двумя частицами почвы, (б) конвекция – теплопередача за счет движения жидкости или воздуха.

8.3.2. Измеримые тепловые параметры

8.3.2.1. Общее обсуждение

Как только теплота передается в грунт, способность почвы удерживать или рассеивать тепло зависит от его теплоемкости и теплопроводности. Тепловые параметры или константы могут быть измерены экспериментально или вычислены по известным формулам. На рисунке 8.3 представлено взаимодействие системы грунт–тепло и их измеримые параметры. В таблице 8.1 представлена сводка тепловых параметров и их единиц. В инженерной геологии теплопроводность и удельное сопротивление чрезвычайно важны, поэтому подробное обсуждение будет представлено в разделе 8.6.

8.3.2.2. Температура и теплота

Температура является мерой внутреннего движения молекул, из которых состоит объект. Чем больше это движение, тем больше внутренняя энергия и тем выше температура. Существуют три разные температурные шкалы, а именно: по Фаренгейту ($^{\circ}\text{F}$), по Цельсию ($^{\circ}\text{C}$) и по абсолютной шкале или в градусах Кельвина (K). По шкале Фаренгейта температура замерзания воды составляет 32°F . Температура кипения воды составляет 212°F . Шкала Цельсия установлена на 0°C для точки замерзания чистой воды и на 100°C для точки кипения чистой воды. Шкала Кельвина или абсолютная шкала подобна шкале Цельсия в том, что деления на шкале имеют одинаковый размер. Но ноль в абсолютной шкале составляет -273 K ; температура кипения воды составляет 373 K . Взаимосвязь и преобразования всех трех типов температурных шкал представлены следующими уравнениями:

$$T^{\circ}\text{C} = 5/9 (T^{\circ}\text{F} - 32^{\circ}) \quad (8.2)$$

$$T^{\circ}\text{F} = 9/5 T^{\circ}\text{C} + 32^{\circ} \quad (8.3)$$

$$T\text{ K} = T^{\circ}\text{C} + 273,18^{\circ} \quad (8.4)$$

где T – температура; C – стоградусная шкала; F – шкала Фаренгейта; K – шкала Кельвина (абсолютная).

Теплота – это тепловая энергия, которая способна передаваться, находится в движении. Если горячий объект находится в контакте с холодным объектом, тепло будет перетекать от горячего к холодному объекту, потому что часть молекулярного движения горячего объекта будет передаваться холодному объекту. Единицей тепла является калорийность (Cal, кал). Одна калория определяется как количество тепла, необходимое для повышения температуры 1 г воды на 1°C .

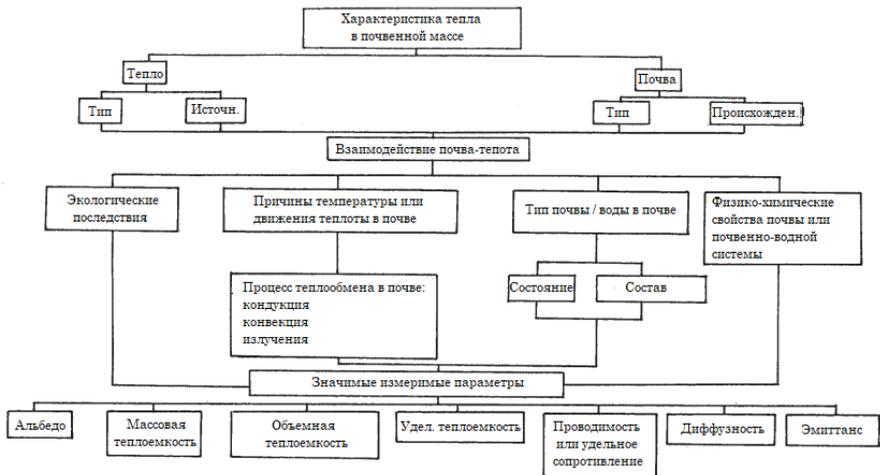


Рисунок 8.3. Взаимодействие систем почва–теплота и их измеримые параметры.

Таблица 8.1. Краткое изложение тепловых параметров и их единиц

Аспект	Количество	Уравнение	Типичная единица	
			SI	c.g.s.
Тепло удерживаемая почвой (удержание тепла)	Массовая теплоемкость ^a (C_m)	$C_m = Q/\text{Temp.}$	J/(g)(°C)	БТЕ/(фунт)(°F)
	Объемная теплоемкость ^b (C_v)	$C_v = C_{mv}$	Дж/(мм ³)(°C)	БТЕ/(фут ³)(°F)
	Удельная теплоемкость ^{a,b} (C_{sp})	$C_{sp} = (C_{mv})_{\text{вещество}} / (C_{mv})_{\text{вода}}$	Безразмерная величина	
Расcеяние тепла (теплопередача)	Теплопроводность ^a (k)	$k = Q/iAt$	W/(м)(°C)	БТЕ/(футы)(S)(°F)
	Тепловое сопротивление ^{a,b} (R)	$R = 1/k$	(м)(°C)/W	(Футы)(S)(°F)/БТЕ
	Температуропроводность ^b (α)	$\alpha = k/C_v$	мм ² /с	фут ² /час

^a Экспериментально определено.

^b Расчетное количество.

³ γ = удельный вес почвы: ρg , где ρ = плотность; g = сила тяжести.

Таблица 8.2. Удельная теплоемкость некоторых глинистых минералов

Глинистые минералы	Температура в градусах Кельвина	Удельная теплоемкость (кал/град/г)
Вермикулит	303–373	0,205
Галлуазит	298	0,228
Каолинит	298	0,227
Мусковит	298	0,193
Na-монтмориллонит	273–303	0,191

Источник: по Low, P. F. (1968), Mineralogical data requirements in soil Physical investigations, SSSA Special Publ. Series no. 3, pp. 1–34.

8.3.2.3. Теплоемкость и удельная теплоемкость

1. *Массовая теплоемкость* (C_m). Массовая теплоемкость определяется как количество тепла (Q), необходимое для увеличения удельного веса материала на.

2. *Объемная теплоемкость* (C_v). Объемная теплоемкость определяется как количество тепла, необходимое для увеличения единицы объема материала на 1° . Данная величина может быть рассчитана, как показано в таблице 8.1.

3. *Удельная теплоемкость* (csp). Удельная теплоемкость – это отношение массовой теплоемкости (C_m) к массовой теплоемкости воды (C_m). Удельная теплоемкость – безразмерная величина. Некоторые типичные теплоемкости глинистых минералов приведены Low (1968), как показано в таблице 8.2.

8.3.2.4. Диффузность

Коэффициент диффузии – это коэффициент теплопроводности и теплоемкости на единицу объема; его единица измерения в системе СИ – $\text{см}^2/\text{с}$. Значение диффузии может быть определено путем расчета, если известны теплопроводность, удельная теплоемкость и плотность грунта. На основании работы, проделанной Kersten (1949), можно сделать следующие общие выводы, касающиеся диффузионной способности почв: (1) изменения температуры не вызывают существенных изменений диффузивности, если они не проходят через точку замерзания, (2) при низком или умеренном содержании влаги увеличение содержания влаги в мерзлой или незамерзшей почве вызывает увеличение коэффициента диффузии, (3) увеличение плотности почвы вызывает небольшое увеличение коэффициента диффузии, (4) минеральный состав влияет на коэффициент диффузии примерно в той же степени, как он влияет на теплопроводность.

8.4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОЧВЫ–ТЕПЛОТЫ

8.4.1. Механизм почвенно-теплового взаимодействия

Взаимосвязь между почвой и теплом у поверхности земли, а также взаимодействие между почвой и теплом и их измеримые параметры обсуждались в предыдущих разделах. Некоторые из этих взаимодействий были обобщены на рисунках 8.1 и 8.3. Почва обычно состоит из твердой, жидкой и газообразной фаз, как описано в разделах 3.2 и 3.3. Механизм теплопередачи отличается на границах разных фаз. Термогеотехнические свойства этой полидисперсной, многофазной системы зависят не только от фазового состава, но также от дисперсии фаз и предшествующего состояния окружающей среды, в которой находилась систем. Кроме того, из-за влияния движения воды в паровой фазе и легкости молекулы воды, вертикальная восходящая теплопроводность влажной почвенной системы может быть значительно больше, чем вертикальная нисходящая. Кроме того, в невозмущенном состоянии твердые частицы, жидкая и газообразная фазы в выращенной почве располагаются в дисперсной структуре, в то время как в состоянии повторного формирования распределение частиц и фаз является случайным (флокулированным). Фактическое состояние большинства почв, представляющих интерес для геотехника, лежит между этими двумя крайностями.

8.4.2. Тепловая емкость почвы

Независимо от типа передачи теплоты, когда тепло передается в землю, способность почвы удерживать или рассеивать тепло зависит от его теплоемкости и теплопроводности, как уже говорилось выше. Чтобы визуализировать теплоаккумулирующую способность (TSC) и другие связанные параметры, на рисунке 8.4 показана идеализированная принципиальная схема, иллюстрирующая соотношение температуры и времени для грунта. При рассмотрении рисунка 8.4 становится понятно, что расстояние от точки **a** до точки **b** – это период нагрева, соответствующий тепловой энергии, поглощаемой почвой на контролируемой глубине. Время для периода нагрева обозначено как ΔT_1 . Период времени (ΔT_2) от точек **b** до **d** соответствует периоду, когда внешнее тепло больше не подводится к поверхности земли, но энергия все еще принимается на контролируемой глубине. Тогда TSC почвы можно определить как площадь под кривой, описанной точками **b**, **c**, **d** и **e**, как показано на рисунке 8.4. Стадия диссипации кривой температура–время находится от точки **d** до **e**. Эта стадия происходит с течением времени ΔT_3 .

С практической точки зрения, идеальная почва для использования в тепловых хранилищах будет иметь небольшое ΔT_1 и большое ΔT_2 . Кроме того, уровни температуры в точках **b**, **c** и **d**, как показано на рисунке, будут высокими и относительно постоянными. Была реализована лабораторная экспериментальная программа для изучения возможности выполнения этих требований в реальной почве. Инженерные применения концепции TSC для сбора и хранения солнечной энергии также было изучено (Fang и Chaney, 1983).

8.5. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОЧВЫ

8.5.1. Теплопроводность

Как указано в таблице 8.1, теплопроводность k конкретного материала определяется как количество тепла (Q), которое обычно протекает по поверхности единичной площади (A) материала в единицу времени (t) на единицу градиента температуры (i). Поток тепла в почве также можно проиллюстрировать как сходный с потоком воды через пористую среду, что соответствует закону Дарси, который часто используется в геотехнической инженерии. Обратная величина теплопроводности (k) называется термическим удельным сопротивлением (R) и является мерой способности материала противостоять тепловому потоку. Это можно проиллюстрировать следующими формулами:

$$k = \frac{Q}{i A t} \quad (8.5)$$

$$R = 1/k \quad (8.6)$$

где R – удельное тепловое сопротивление, k – теплопроводность, Q – количество тепла, i – градиент температуры, A – единица площади, которая протекает нормально, t – время.

Теплопроводность определяется в уравнении 8.5. Значение проводимости почвы зависит от теплопроводности ее твердых, жидких и газообразных компонентов, от их объемных пропорций и расположение частиц или структуры. На саму структуру влияют размер, форма и градация компонентов. Как правило,

твердые вещества проводят тепло лучше, чем жидкости, а жидкости лучше, чем газы. Поэтому для описания теплопроводности совокупности частиц почвы необходимо описать способ, согласно которому твердые частицы либо вступают в контакт друг с другом, либо разделяются промежуточной жидкой и газообразной фазами.

На рисунке 8.5 представлены измеренные и рассчитанные значения теплопроводности для сухого и насыщенного воздуха в зависимости от плотности канадской глины из Леда в сухом состоянии (Penner, 1963). Во всех случаях увеличение сухой плотности будет увеличивать теплопроводность. На рисунке 8.6 приведен график зависимости логарифма теплопроводности от пористости гомогенных каолиновых глин (Na, Al, Ca) при постоянном содержании воды. Во всех случаях уменьшение содержания воды и увеличение пористости приведет к снижению теплопроводности. Рисунок 8.7 суммирует теплопроводность и удельное сопротивление в зависимости от относительной плотности и пустотности сухого песка Монтерея 0. Во всех случаях увеличение относительной плотности или уменьшение коэффициента пустот приведет к снижению теплового удельного сопротивления или увеличению проводимости.

8.5.2. Тепловое сопротивление

8.5.2.1. Общее обсуждение

Тепловое сопротивление является обратной величиной теплопроводности, как указано в уравнении 8.6. Тепловое удельное сопротивление почвы включает в себя ряд факторов, таких как плотность, влажность, размер зерна, содержание глины и т. д. Опыт показывает, что удельное сопротивление варьируется в широких пределах в разных частях страны. На рисунке 8.8 показана взаимосвязь между удельным тепловым сопротивлением и электропроводностью песка при постоянной плотности. Содержание влаги варьируется от 0 (сухое состояние) до 100 % по весу. В таблице 8.3 приведены значения удельного теплового сопротивления в °C-см/ватт (R_{ho}) материала.

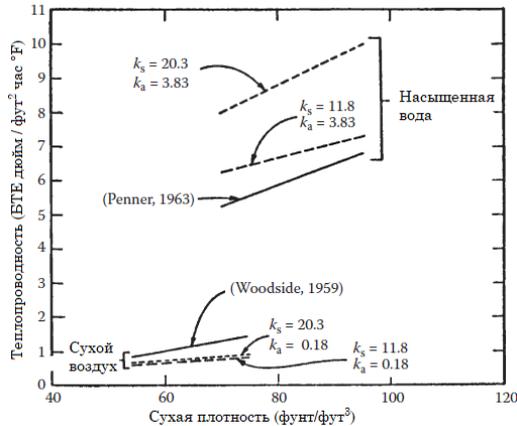


Рисунок 8.5. Теплопроводность и сухая плотность для канадской глины из Леда (по Penner, E. [1963], Proc. Int. Conf. of Permafrost, NAS-NRC Publ. 1287. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не подлежит защите авторских прав).

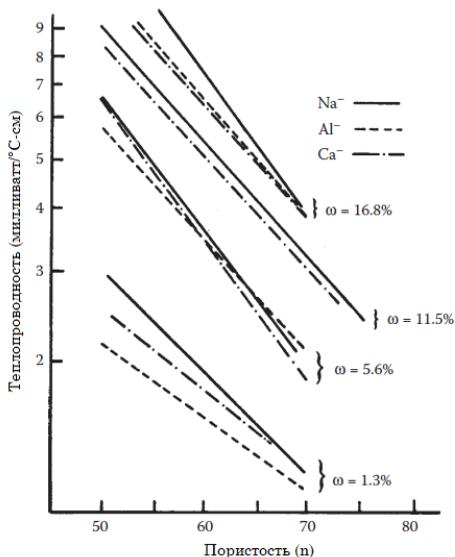


Рисунок 8.6. Теплопроводность и пористость природной каолиновой глины (по Reno, W. H. and Winterkorn, H. F. [1967], Thermal conductivity of kaolinite clay as a function of type of exchange ion, density and moisture content, Highway Research Record v. 209, pp. 79–85. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в свободном доступе и не подлежит защите авторских прав).

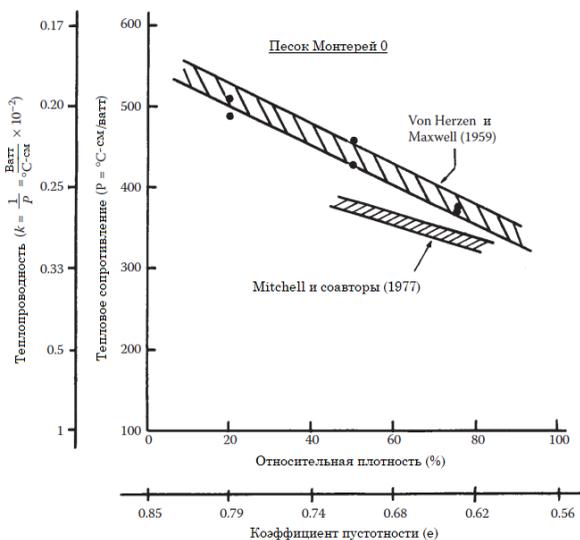


Рисунок 8.7. Теплопроводность в сравнении с относительной плотностью и соотношением пустот сухого песка (по Chaney, R. C. et al. [1983], ASTM Geotech. Testing J., v. 6, n. 4, pp. 220–225).

8.5.2.2. Практические аспекты теплового сопротивления

Тепловое сопротивление является важным параметром, касающимся многих экологических геотехнических проблем; некоторые комментарии касательно практических аспектов на основе данных в таблицах 8.3 и 8.4 представлены далее.

1. Кварц, безусловно, имеет самое низкое тепловое сопротивление среди всех перечисленных материалов.

2. Каменные горные породы, будучи относительно плотными, однородными объектами, имеют более низкое тепловое сопротивление, чем почвы. Более однородные породы (например, определенные виды гранита) имеют более низкое тепловое сопротивление, чем менее однородные породы, такие как известняк и песчаник.

3. В тех же условиях твердый, плотный грунт должен иметь более низкое тепловое сопротивление, чем более пористый грунт. Влажная почва должна иметь более низкое тепловое сопротивление, чем сухая почва.

8.5.2.3. Влияние содержания влаги и плотности

Влияние содержания влаги и плотности на удельное тепловое сопротивление или проводимость некоторых почв представлено на рисунках 8.5, 8.6 и 8.8. Их поведение можно объяснить следующим образом.

1. В сухой или частично насыщенной почве присутствие воздуха с его высоким тепловым удельным сопротивлением значительно увеличивает общее тепловое удельное сопротивление почвы.

2. Очевидно, что уплотнение должно снижать тепловое сопротивление материала как за счет уменьшения общего объема пустот, так и за счет улучшения контакта между твердыми частицами. Таблица 8.4 иллюстрирует величину этого эффекта.

Данные из таблицы 8.4 ясно демонстрируют, как более плотная и более компактная гранулярная система сравнивается с менее плотной системой. Даже умеренная степень уплотнения значительно улучшает тепловое сопротивление. Большая степень уплотнения может значительно улучшить тепловое сопротивление.

Таблица 8.3. Значения термического удельного сопротивления почвенных компонентов

Вещество	Тепловое сопротивление (°C-см/ватт)
Воздух	4000
Гранит	25–58
Известняк	45
Слюда	170
Органическое вещество (мокрое)	400
Органическое вещество (сухое)	700
Песчаник	58
Вода	165

Источник: данные выбраны из: Sinclair, W. A. et al. (1960), A Report of the AIEE Insulated Conductors Committee, Report no. 60-785, pp. 71–94; Jumikis, A. R. (1966), Thermal Soil Mechanics, Rutgers State University Press, New Jersey.

Таблица 8.4. Влияние плотности и содержания воздуха на тепловое сопротивление компонентов почвы

Минерал	Плотность (г/см ³)	Объем воздуха (%)	Тепловое сопротивление (°С·см/ватт)
Кварц	2,640	0	11
Щебень кварцевый	1,307	50,6	573
Щебень кварцевый	1,512	42,7	392
Мелкоизмельченный кварц	0,824	68,9	1270
Мелко измельченный кварц	1.600	39.4	228

Источник: данные выбраны из: Van Rooyen, M. and Winterkorn, H. F. 1959), Proc. HRB, v. 38, pp. 576–621; Sinclair, W. A. et al. (1960), A Report of the AIEE Insulated Conductors Committee, Report № 60-785, pp. 71–94.

3. Наличие влаги также существенно влияет на тепловое сопротивление почвы, как показано на рисунке 8.8. Количество влаги, добавляемой к сухому гранулированному материалу, имеет тенденцию распределяться в виде тонкой пленки на поверхности твердых зерен. Небольшое количество этой воды может попасть в «твердый раствор» (раздел 4.9) на поверхности зерна. Остальное остается в виде пленки на поверхности. Такая пленка, известная как гигроскопичная вода, должна значительно снизить контактное сопротивление между зернами, а форма кривых термического сопротивления, удельного сопротивления и влажности (рисунок 8.5) показывает, что это действительно так.

8.6. ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОТЫ ИЛИ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕДЕНИЕ ПОЧВЫ

8.6.1. Общее обсуждение

Чтобы понять влияние температуры и теплоты на почву, необходимо понять то, как температура или теплота влияют на каждую из фаз основных компонентов (твердых, жидких, газовых) в отдельности, а также их взаимодействие друг с другом в рамках общей системы. В этом разделе мы обсудим, как температура или теплота, связанные с влажностью в порах почвы, будут влиять на прочность и сжимаемость почвы и других строительных материалов.

1. Низкотемпературный диапазон (5–100°С).
2. Среднетемпературный диапазон (100–250°С).
3. Высокотемпературный диапазон (расплав).

8.6.2. Характеристики почвенно-тепловой системы

Как правило, увеличение объема воды при увеличении температуры при постоянном давлении и уменьшении внутреннего трения жидкой фазы приведет к увеличению газообразной фазы. Это смазывающее действие в почвенной массе может быть весьма незначительным, особенно если почва имеет зернистый несущий скелет. С другой стороны, почвы без гранулированных несущих каркасов имеют большую площадь поверхности, которую необходимо смазывать при уплотнении и взаимодействие которой с водой зависит от температуры.

Существование такого взаимодействия известно давно, так как оно зависит от типа и размера минеральной поверхности, типа и количества обмениваемых ионов, а также от среды электролита в контактирующей водной фазе.

Влияние температуры на это взаимодействие может быть объяснено с помощью физико-химических концепций. В начале 1930-х годов это влияние на извлеченных природных глинах в широком диапазоне влажности и диапазоне температур от 30°C до 99°C изучали Baver и Winterkorn (1935). Чтобы объяснить результаты этих исследований, они разделили общее взаимодействие (набухание) воды при повышенном содержании влаги с водой для гидратации (раздел 4.8), связывание которой сопряжено со значительным количеством тепла смачивающей и осмотической воды и относительно свободной воды между гидратированными катионами в так называемом диффузном двойном слое (раздел 9.8). Оба типа воды неразрывно связаны с диэлектрической водной проницаемостью.

Поскольку последняя уменьшается с повышением температуры, а затем происходит более быстрое увеличение кинетической энергии обменных ионов с повышением температуры, можно ожидать уменьшения как количества воды для гидратации, так и количества осмотической воды в насыщенной почвенной системе с ростом температуры. Это означает, что при постоянном содержании воды повышение температуры приводит к уменьшению той водной части, которая связана или удерживается, и увеличивает долю той воды, которая свободна, а также снижает вязкость последней.

Хотя этот температурный эффект довольно прост в относительно чистых системах глина–вода в ограниченном диапазоне температур, он становится более сложным, когда высокие температуры будут вызывать заметные эффекты рассеивания или флокуляции в зависимости от глинистого минерала и типа ионного обмена. Еще большая сложность получается при наличии неглинистых минералов ила и более крупнозернистых осадков. Основным явлением, однако, является уменьшение взаимодействия воды с повышением температуры. Это уменьшение обычно приводит к увеличению гидравлической проводимости с повышением температуры. Однако при наличии сильного дисперсионного эффекта проводимость может фактически уменьшаться, особенно если глина содержится в междуузлиях крупнозернистого скелета.

Только что представленные факты и соображения должны поразить человека огромной важностью визуализации всех геометрических, гранулометрических и структурных факторов в системе, которые либо сдерживают, либо позволяют полностью выразить взаимодействие минерал–вода–температура. Именно с такой точки зрения следует анализировать данные, представленные в литературе. Ограниченный выбор таких выводов приводится ниже.

8.6.3. Эффект поведения почвы в низкотемпературном диапазоне

8.6.3.1. Почвенные константы

Влияние температуры или тепла на параметры почвы, отраженное на жидких и пластических границах почвы, изучалось многими исследователями. Youssef и соавторы (1961) при испытаниях египетских глин – от мягких до темно-коричневых – обнаружили, что изменения температуры вызывали изменение верхнего предела пластичности и предела пластичности, пропорциональных

изменению вязкости воды при изменении температуры. Laguros (1969), тестируя каолинитовую, иллитовую, монтмориллонитовую и монтмориллонитно-иллитовую глины, обнаружил, что их названные пределы уменьшались с повышением температуры с максимальным эффектом в случае монтмориллонитовой глины (рисунок 8.9).

8.6.3.2. Соотношение вес–влаги для почвы

Высокая температура влияет на уплотнение почвы, особенно почв с высоким содержанием глины. Hogentogler (1937) сообщил о лабораторных испытаниях, направленных на уплотнение глинистой почвы, в которых удельный вес увеличился на $0,47 \text{ кН/м}^3$, а оптимальное содержание влаги (ОМС) уменьшилось на 3 %, когда температура почвы увеличилась с $1,1^\circ\text{C}$ до 46°C . В аналогичном исследовании Woods (1940) обнаружил, что для песчаной глины разница в максимальном весе сухой единицы при температурах от $1,7$ до $23,9^\circ\text{C}$ составляла 2 %. Burmister (1964) установил, что сухой вес единицы названной почвы, уплотненной в ОМС, составляет $16,3 \text{ кН/м}$ при $18,3^\circ\text{C}$, тогда как при $1,7^\circ\text{C}$ он составляет всего $14,1 \text{ кН/м}$. Laguros (1969) получил сопоставимые результаты при работе с глинистыми почвами, содержащими каолиновый, иллитический, монтмориллонитовый и монтмориллонитно-иллитовый глинистые минералы. Дальнейшее обсуждение влияния температуры (выше и ниже 0°C) на отношение массы к влаге будет представлено в разделе 11.2 и на рисунке 11.5.

8.6.3.3. Сжимаемость

Gray (1936) сообщил об увеличении сжимаемости с повышением температуры, причем наибольшие эффекты наблюдаются в диапазоне вторичной консолидации. Lewis (1950), который исследовал образцы лондонской глины при температуре от 5 до 15°C , пришел к выводу, что изменение температуры мало влияет на коэффициент сжимаемости, но значительно влияет на коэффициент уплотнения. Burmister (1951) описал температурные эффекты, которые он считал достаточно серьезными, чтобы сделать результаты обычных испытаний на уплотнение бесполезными. Finn (1951), исследуя влияние температуры на характеристики уплотнения многослойных глин при первичном сжатии, обнаружил, что кубический сантиметр радикально увеличился между $4,4$ и $21,1^\circ\text{C}$, но почти не увеличился между $21,1$ и $26,6^\circ\text{C}$. Lambe (1958) сообщил об уменьшении объема почвы с увеличением температуры, наблюдаемом при испытаниях, проводимых при постоянном давлении, причем температура являлась единственной внешней переменной. Lo (1961) продемонстрировал, что даже относительно небольшие изменения температуры могут вызвать заметное изменение сжимаемости во вторичном диапазоне уплотнения. Аналогичные выводы о влиянии температуры на вторичное сжатие сделали Campanella и Mitchell (1968).

Plum и Esrig (1969) обнаружили, что степень уплотнения, вызванного температурой, связана со сжимаемостью почвы; чем выше сжимаемость, тем больше уплотнение для данного повышения температуры. Они также показали объемную деформацию системы иллит–вода как функцию коэффициента избыточной консолидации (OCR) для повышения температуры от 24°C до 50°C . Влияние температуры на поведение первичной консолидации слабоорганической почвы исследовано Nabibagahi (1976). Из диапазона температур испытания от

25°C до 50°C он пришел к выводу, что коэффициент пустотности уменьшается с ростом температуры при постоянном давлении уплотнения.

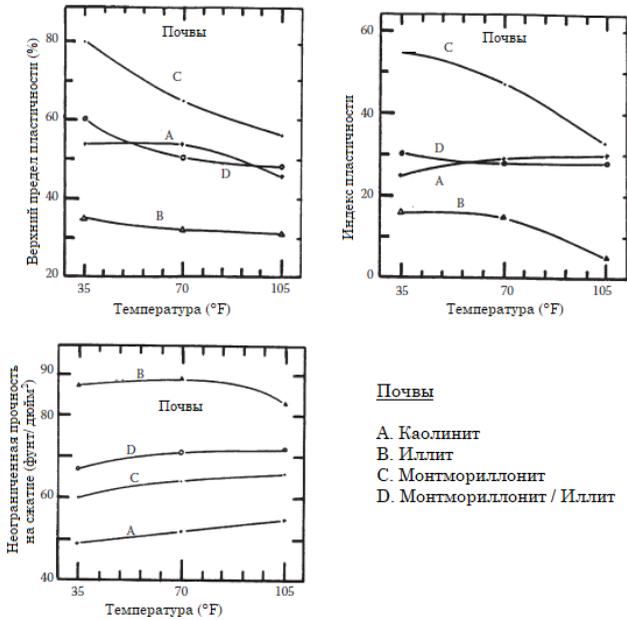


Рисунок 8.9. Влияние температуры на верхний предел пластичности, индекс пластичности и неограниченную прочность на сжатие четырех глинистых минералов (по Laguros, J. G. [1969], Effect of temperature on some engineering properties of clay soils, HRB Special Report 103, pp. 186–203. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в свободном доступе и не подлежит обсуждению. на защиту авторских прав).

8.6.3.4. Давление поровой воды

Campanella и Mitchell (1968) подчеркивают роль изменений давления поровой воды, сопровождающих изменение температуры. По-видимому, определяющими факторами в условиях дренирования являются тепловое расширение поровой воды, сжимаемость структуры почвы и начальное эффективное напряжение. Их экспериментальные результаты показывают несколько систем глины и воды, в которых каждое изменение температуры на 1°F изменяло давление в поровой воде примерно на 0,75–1,0 % от начального эффективного напряжения. Для менее сжимаемых материалов изменение давления в поровой воде было значительно больше.

8.6.3.5. Модуль и прочность на сдвиг

Miyayama (1969), используя реологическую модель для анализа модуля упругости систем вода–глина, показал, что модуль уменьшается с ростом температуры. Mitchell (1969) изучал взаимосвязь между начальным напряжением и деформацией в тестах на релаксацию напряжения при различных температурах.

Рассматривая прямолинейные участки кривых на графике как репрезентативные для модуля упругости грунта, он пришел к выводу, что модуль уменьшается с ростом температуры. На рисунке 8.10 показано влияние температуры воды на эрозионное напряжение сдвига для натриевой монтмориллонитовой глины (Liou, 1970). Известно, что если в течение определенного времени температура воды увеличивается, то напряжение эрозионного сдвига также увеличивается.

Аналогичные выводы о влиянии температуры на прочность на сдвиг были сделаны многими исследователями (HRB, 1969). Следует иметь в виду, что, за исключением испытаний на предел Аттерберга и испытаний на уплотнение, влияние температуры на почвенно-водные системы определялось при постоянном содержании воды или при свободном доступе к водохранилищу. Если изменение температуры связано с изменением содержания влаги, то суммарный эффект представляет собой сумму или разницу – в зависимости от обстоятельств, воздействия изменения температуры и влажности. Это, конечно, является причиной того, что испытания нагрузки полевой пластины дают более высокие значения для модулей и подшипника в более теплые месяцы (Benkelman и соавторы, 1962).

Общее влияние температуры на технические свойства почв субстрата обобщено в таблице 8.5. Тем не менее содержащаяся в ней информация должна использоваться с осторожностью из-за возможных модифицирующих или противодействующих эффектов, из-за ранее упомянутых геометрических, гранулометрических и структурных факторов почвы.

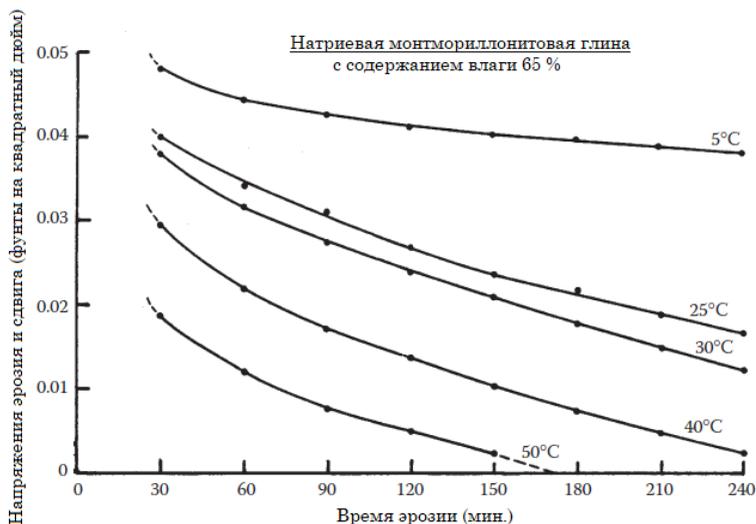


Рисунок 8.10. Влияние температуры воды на эрозионное напряжение сдвига для натриевой монтмориллонитовой глины (по Liou, Y. D. [1970], Hydraulic erodibility of two pure clay systems, Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, CO).

Таблица 8.5. Общее влияние температуры на геотехнические свойства почв

Свойства почвы	Температура	
	Низкая	Высокая
Удержание воды	Высокое	Низкое
Верхний предел пластичности	Высокий	Низкий
Предел пластичности	Высокий	Низкий
Максимальный объемный вес уплотненного материала	Уменьшается	Увеличивается
Оптимальное содержание влаги	Увеличивается	Уменьшается
Коэффициент пустотности ¹	Высокий	Низкий
Изменение объема ¹	Набухание	Усадка
Коэффициент сжимаемости, A_v	Уменьшается	Увеличивается
Давление в поровой воде, u	Уменьшается	Увеличивается
Коэффициент проницаемости, k	Уменьшается	Увеличивается
Прочность на сдвиг	Высокая	Низкая
Модуль	Высокий	Низкий

¹ При постоянном давлении в открытой насыщенной системе.

8.6.4. Влияние поведения почвы на среднетемпературный диапазон

Термическая обработка или термостабилизация определяется как необратимое и эффективное повышение прочности на сдвиг грунта или породы. Основываясь на экспериментальной работе, о которой сообщили Wohlbiel и Henning (1969), предварительная термическая обработка каолиновой глины, особенно каолиновой глины из Цетлица, обеспечивает эффективную стабилизацию, то есть постоянное увеличение прочности на сдвиг. Что касается прочности на сдвиг предварительно термообработанных образцов связного грунта, то вода как пустотное заполнение имеет особое значение. В случае материала, в котором увеличение прочности обусловлено только его капиллярным натяжением, а не изменением структуры, эффект стабилизации при уменьшении этой капиллярности путем добавления воды необратим.

Влияние термической обработки на прочность каолинита в более высоких температурных диапазонах (от 200°C до 600°C) показано на рисунке 8.11. Во всех случаях с повышением температуры прочность на сдвиг также увеличивается. Также Chandrasekharan и соавторы (1969), изучая влияние термообработки на индийскую черную хлопковую почву (раздел 13.4), обнаружили умеренное снижение ее стремления к воде в начальных диапазонах термообработки между 25°C и 200°C. Сообщалось, что влияние температуры на свойства консистенции латеритного грунта незначительно из-за относительно инертного характера глинистых минералов, таких как каолинит, оксиды железа и алюминия.

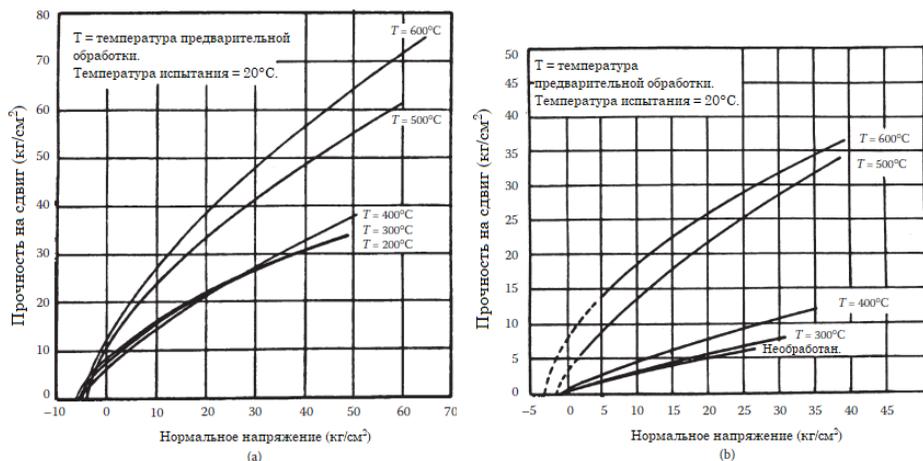


Рисунок 8.11. Влияние термической обработки на прочность каолиновой глины: (а) сухие образцы, (б) повторное увлажнение образцов (по Wohlbier, H. and Henning, D. [1969], Effect of preliminary heat treatment on the shear strength of kaolinite clay, HRB Special Report 103, pp. 287–300. Этот материал является собственностью правительства США, но в свободном доступе и не подлежит защите авторских прав).

8.6.5. Плавление

Плавление – это нагревательный процесс для превращения твердого вещества в жидкость. Это также относится к реакциям между маленькими атомными ядрами с образованием более крупных ядер. Твердая фаза почвенной частицы может состоять из множества различных минералов, некоторые из которых содержат воду в качестве неотъемлемой части структуры своей кристаллической решетки. Большинство твердых частиц также удерживают поверхностные слои воды посредством молекулярного притяжения (адсорбции).

Почвенная масса также содержит карбонатные и сульфатные минералы, которые при достаточном нагревании будут дегазировать с последующим изменением кристаллической структуры. Глинистые минералы могут также содержать слои воды, который связывается с поверхностями глинистых минералов отрицательными зарядами, которыми обладают глинистые минеральные структуры и катионы. Эта связанная вода между минеральными структурами и катионами требует значительной тепловой энергии для отделения от твердых веществ. Когда температура почвы увеличивается, свободная промежуточная вода отгоняется; затем также отгоняется адсорбированная вода. По мере дальнейшего повышения температуры вода для гидратации удаляется, и образуются новые минералы, имеющие различные кристаллические морфологии. Процесс слияния был использован для стабилизации почвы и ее улучшения. Типичные данные о температуре плавления некоторых распространенных глинистых минералов и диапазоне плавления материала почвенного заполнителя представлены в таблицах 8.6 и 8.7. Типичные минеральные составы получены из данных, приведенных в таблицах Deer и соавторов (1962). Подробное обсуждение этих аспектов приводится в работах Post и Paduana (1969).

8.7. Замерзшие и оттаивающие почвы

8.7.1. Идентификация и описание льда в почве

Лед – это форма воды. Переход от воды ко льду может быть осуществлен при 32°F путем отвода тепловой энергии в количестве 144 БТЕ/фунт без какого-либо изменения температуры. Рост льда в виде отдельных линз, слоев, жил и масс в почве обычно, но не всегда, ориентирован нормально к направлению потери тепла. Ледяные линзы – это ледяные образования в почве, находящиеся по существу параллельно друг другу, как правило, в направлении потери тепла, обычно в повторяющихся слоях. Холодный поток похож на тепловой. Перенос холода также осуществляется кондукцией, конвекцией и излучением.

Идентификация и описание мерзлых грунтов подробно обсуждали Andersland и Anderson (1978) и Phukan (1985, 1991). Описание мерзлых грунтов на основе визуального осмотра и простых ручных испытаний было предложено ASTM (ASTM D4083-89). Эта практика предназначена главным образом для использования почвенными инженерами и техниками в полевых условиях, где профили почвы могут наблюдаться в относительно невозмущенном (замороженном) состоянии или могут использоваться в лаборатории для описания состояния относительно ненарушенных образцов почвы, которые содержались в замороженном состоянии после их сбора в поле. В таблице 8.8 представлено общее описание мерзлых грунтов на основе визуального осмотра и простых ручных испытаний, предложенных ASTM.

Система описания и классификации мерзлых грунтов основана на процедуре идентификации, которая включает три этапа: (1) первый состоит из описания фазы почвы, (2) второй состоит из сложения характеристик почвы, полученных при ее изучении в замерзшем состоянии, (3) третий состоит из описания важных слоев льда, связанных с почвой. В дополнение к описанию профиля почвы на данном участке обычно полезно описать местные экологические и геологические условия, такие как особенности местности, растительный покров, глубину и тип снежного покрова, местный рельеф, условия дренажа, а также глубину оттепели (Shockley, 1978).

8.7.2. Глубина проникновения холода и сдвиг

8.7.2.1. Аналитические подходы

Глубина замерзания или проникновения холода в почву может быть рассчитана с помощью теории теплопередачи. Теория основана на теплопроводности как в стационарном, так и в нестационарном потоке тепла. Для расчета глубины замерзания в геотехнике обычно используются два общих уравнения: уравнение Стефана и уравнение Берггрена (Berggren, 1943; Aldrich, 1956). Уравнение Стефана основано на том, что (1) почва является однородной, (2) объемная теплота скрытого плавления является единственной теплотой, которая должна быть удалена при замерзании почвы (то есть объемная теплота не учитывается), (3) градиент температуры в замороженной зоне является линейным, (4) поровая вода не движется. Вывод, ограничение и применение уравнения Стефана дал Jumikis (1955). Для уравнения Берггрена основным уравнением является уравнение теплопроводности. Это похоже на уравнение консолидации Terzaghi. Строгое решение уравнения теплопроводности, которое сделал Berggren, изменили в 1953 году Aldrich и Paynter (Aldrich, 1956).

Таблица 8.6. Точка плавления некоторых почвенных минералов и горных пород

Минералы	Водный остаток	Типичные атомные пропорции сухого расплава									Температура плавления (°C)	
		CaO	K ₂ O	Na ₂ O	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Ожидаемая	Наблюдаемая
Общие минералы почвы (не глина)												
Полевые шпаты												
Альбит	—	0.004	—	0.114	—	—	—	—	0.200	0.682	1115	1100–1200
Олигоклаз	—	0.040	—	0.091	—	—	—	—	0.232	0.637	1200	1200–1300
Анлезит	—	0.078	—	0.067	—	—	—	—	0.261	0.594	1305	1300–1355
Микроклин	—	—	0.133	0.024	—	—	—	—	0.198	0.645	1355	1150–1530
Ортоклаз	—	—	0.105	0.042	—	—	—	—	0.199	0.654	1305	1150–1530
Анортоклаз	—	0.012	0.042	0.080	—	—	—	—	0.207	0.659	1200	1100–1200
Амфиболы												
Роговая обманка	1.9	0.124	—	0.010	0.101	0.034	0.009	0.150	0.073	0.499	—	1180–1220
Пироксены												
Энстатит	0.3	0.008	—	—	0.046	0.006	—	0.353	0.010	0.577	—	1380–1500
Авгит	0.5	0.193	—	—	0.094	0.019	0.008	0.142	0.035	0.509	—	1150
Карбонаты												
Кальцит	44.4 CO ₂	1.000	—	—	—	—	—	—	—	—	2550	2570
Доломит	47.4 CO ₂	0.579	—	—	0.025	—	—	0.396	—	—	2300	2100
Сульфаты												
Гипс	20.5	1.000	—	—	—	—	—	—	—	—	2550	—
Цеолиги												
Анальцима	8.3	—	—	0.147	—	—	—	—	0.254	0.599	1150	—
Оксиды железа												
Гематит	—	—	—	—	—	1.000	—	—	—	—	—	1594
Гетит	10.5	—	—	—	—	1.987	—	—	—	0.013	1585	—
Магнетит	—	—	—	—	0.309	0.691	—	—	—	—	—	1594
Оксиды оксида алюминия												
Гиббсит	33.7	—	—	—	—	—	—	—	0.979	0.021	2025	2020

Таблица 8.6. Точка плавления некоторых почвенных минералов и горных пород (продолжение)

Минералы	Водный остаток	Типичные атомные пропорции сухого расплава									Температура плавления (°C)	
		CaO	K ₂ O	Na ₂ O	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Ожидаемая	Наблюдаемая
Общие минералы почвы (не глина)												
Корунд	—	—	—	—	—	0.010	—	—	0.983	0.007	2025	2020
Другие	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.000	—	1720
Кварц	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1400
Ильменит	—	—	—	—	0.411	0.071	0.505	0.013	—	—	1390	1400
Галит	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	801
Глинистые минералы												
Камилиты												
Каолинит	14.3	—	—	—	—	—	—	—	0.480	0.540	1810	1785
Галлуазит	17.4	—	0.006	—	—	—	—	—	0.456	0.538	1800	1775
Смектиты												
Монтмориллонит	21.2	0.030	—	—	—	0.029	—	0.041	0.236	0.664	1490	—
Нонтронит	22.4	0.029	—	—	—	0.380	—	—	0.071	0.520	1580	—
Слюды												
Мусковит	4.8	—	0.106	0.009	—	—	—	—	0.395	0.490	—	1255–1290
Флогопит	3.1	—	0.098	—	0.048	0.031	0.016	0.231	0.158	0.418	1200	—
Биотит	2.3	—	0.086	—	0.186	0.056	0.038	0.094	0.153	0.387	—	1155–1240
Другие												
Иллит	7.2	—	0.071	—	—	0.041	—	0.019	0.279	0.600	1590	—
Вермикулит	19.1	—	—	—	—	0.012	0.065	—	0.291	0.197	0.435	1580
Ранделлит	11.3	—	—	—	0.255	0.034	—	0.185	0.231	0.295	1540	—
Аттапульмит	19.9	—	0.006	—	—	0.044	—	0.131	0.129	0.690	1530	1380–1500
Звезевик	13.5	—	—	—	—	0.005	—	0.483	0.012	0.500	1800	—

Источник: Post, J. L. and Paduana, J. A. (1969), Soil stabilization by incipient fusion, Highway Research Board Special Report 103, National Research Council, Washington, D.C., pp. 243–253.

не Таблица 8.7. Диапазон сплава почвенного агрегатного материала

Номер почвы	Вещество	Приблизительный диапазон расплава (°C)	
		Ожидаемый	Наблюдаемый
Природные почвы			
1	Бентонит из Блэк Хиллз	—	1340
2	Известковая почва из Тижерас, Нью-Мексико	1950–2050	—
3	Прибрежная глинистая почва, TX	1600–1620	—
4	Почва из Эстанция Плая, NM	1350–1400	1220–1260
5	Гранитный детритный грунт, NM	1200–1320	1310–1335
6	Гавайская латеритная почва	1900–1950	—
7	Хейс, почва KS	1250–1495	1235–1285
8	Магнезиальная почва, NM	1350–1435	1280–1310
9	Подзол почвы, WI	1350–1450	—
10	Песчаные дюны в Рио-Саладо, NM	1300–1400	1330–1340
Агрегаты			
	Базальт (и габбро)	—	1140 ^a
	Глины (Северная Америка)	—	1580–1800
	Глины (глинозем)	—	1800–1880
	Глины (каменноугольные)	—	1605–1675
	Гранит (и риолит)	—	800–1100
	Каолин (юг)	—	1645–1785
	Кремнеземный песок	—	1700–1750
Искусственные почвы			
	Известняковая почва	1300–1325	1235–1300
	Глинистый грунт	1300–1390	1310–1340
	Органический известковый грунт	1275–1300	1220

^a Базальт может иметь диапазон расплава от 1100°C до 1400°C.

Источник: Post, J. L. and Paduana, J. A. (1969), Soil stabilization by incipient fusion, Highway Research Board Special Report 103, National Research Council, Washington, D.C., pp. 243–253.

8.7.2.2. Измерение *in situ*

Существует множество методов измерения глубины заморозков в условиях *in situ*. Среди этих методов наиболее распространенным является метод удельного электрического сопротивления. В AASHO Road Test (Carey и Andersland, 1957) разрабатывалось устройство, с помощью которого можно было бы определять глубину замерзания, не нарушая дорожное покрытие. Система основывалась на знании того, что электрическое сопротивление почвенно-водной системы быстро меняется при замерзании из-за большой разницы в удельном сопротивлении между твердой и жидкой фазами воды. Пары электродов утоплены в почве на 1 дюйм. Интервалы глубины были связаны с проводами, которые простирались до поверхности. Измерения сопротивления на этих электродах показали глубину замерзания почвенно-водной системы. Типичная глубина замерзания при различных условиях покрытия из AASHO Road Test представлена на рисунке 8.12. Дальнейшее обсуждение метода электросопротивления для определения глубины заморозков будет представлено в разделе 9.4. На рисунке 8.13 дана взаимосвязь между индексом замерзания воздуха, поверхностным покрытием и проникновением холода в однородные почвы, согласно разработкам Sanger (1963). Эти отношения зависят от типов и свойств почвы. Термин «индекс замерзания воздуха» будет объяснен в следующем разделе.

Таблица 8.8. Описание мерзлых грунтов (визуально-ручная процедура) (ASTM D4083-89)

Описание мерзлых грунтов: лед не виден			
Подгруппа			
Символ группы	Описание	Символ	Идентификация поля
N	Слабо связанный или рыхлый грунт	N_t	Выявить путем визуального осмотра; для определения наличия избытка льда используйте процедуру, указанную в примечании 2, и при необходимости увеличительное стекло; для почв, не полностью насыщенных, оцените степень насыщенности льдом (средняя, низкая); обратите внимание на наличие кристаллов или ледяных корок вокруг крупных частей.
	Нет лишнего льда		
	Хорошо связан	N_b, N_{bw}	
	Избыток льда	N_{be}	

Примечание 1. Определить наличие льда в пустотах замороженных почв из группы N можно при тщательном рассмотрении – нужно поискать кристаллический блеск на трещиноватых или сбитых поверхностях. При рассмотрении невооруженным глазом может показаться, что замерзшая вода не занимает места, превышающего первоначальные пустоты в почве. С мерзлыми грунтами группы V дела обстоят противоположным образом.

Примечание 2. Когда визуальные методы не подходят, можно провести простой полевой тест, чтобы оценить объем избыточного льда. Поместив немного мерзлой почвы в небольшую банку, нужно позволить почве растаять, а затем наблюдать количество надосадочной воды в процентах от общего объема.

Описание мерзлых грунтов: видимый лед толщиной менее 1 дюйма (25 мм)			
Подгруппа			
Символ группы	Описание	Символ	Идентификация поля
	Индивидуальный ледяной кристалл или включения	V_s	Для ледяной фазы зафиксируйте следующее, когда это применимо
	Ледяное покрытие на частицах	V_s	Расположение Размер
	Случайные или нерегулярно ориентированные ледяные образования	V_c	Ориентация Форма Толщина Схема расположения
	Стратифицированные или отчетливо ориентированные ледяные образования	V_r	Длина Расстояние
	Равномерно распределенный лед	V_s	Твердость Структура Цвет
			Оцените объем видимого сегрегированного льда в процентах от общего объема образца
Описание видимых ледяных пластов толщиной более 1 дюйма (25 мм)			
Подгруппа			
ICE	Лед с почвенными включениями	ICE + тип почвы	Обозначьте материал как ICE (примечание 1) и используйте описательные термины следующим образом, обычно по одному элементу из каждой группы, когда это возможно
	Лед без почвенных включений	ICE	
			Твердость жесткий мягкий (по массе, а не отдельные кристаллы)
			Структура (примечание 2) чистый облачный пористый просвечивающий зернистый слоистый

			Цвет (Примеры) Бесцветный Серый Голубой	Примеси (Примеры) Содержит несколько тонких иловых включений
--	--	--	---	---

Примечание 1. Там, где можно выделить особые формы льда, такие как иней, следует дать более четкое описание.

Примечание 2. Наблюдатель должен быть осторожен, чтобы избежать введенным в заблуждение царапинами на поверхности или морозным покрытием на льду.

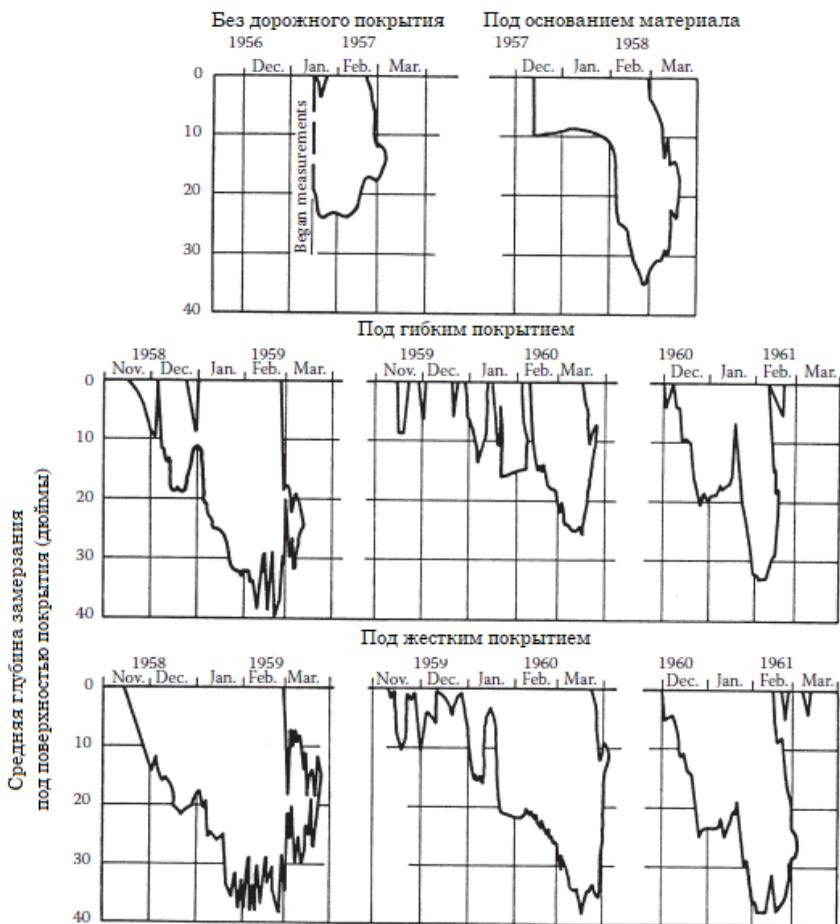


Рисунок 8.12. Глубина заморозков при различных видах покрытия (данные из: AASHO Road Test HRB, 1962b. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не защищен авторским правом).

8.7.2.3. Набухание из-за холода и скорость набухания

Морозное набухание – это поднятие поверхности из-за образования льда в подстилающей почве, которое выражается в процентах подъема. Этот процент представляет собой отношение величины набухания к глубине мерзлого грунта перед замерзанием. На процент подъема влияют типы почвы, удельный вес почвы и процент мелкозернистых частиц (менее 0,02 мм). Во всех случаях увеличение содержания мелкозернистого материала приведет к увеличению процента подъема для всех типов почвы. На рисунке 8.14 представлена зависимость морозного набухания от массы сухого блока различных типов почв. На рисунке 8.15 показано влияние песка, добавляемого с различными количествами глинистых минералов и глин, на скорость набухания. При рассмотрении рисунка 8.15 во всех случаях средняя скорость подъема увеличивается с увеличением доли мелких частиц в почве.

Данные о замерзании и скорости набухания важны при проектировании дорожного покрытия. Количество мелких частиц в почве или грунте имеет решающее значение при замерзании и прочих нежелательных явлениях. Морозное кипение – это разрушение локализованного участка шоссе или аэродромного покрытия и выброс грунта в мягких и влажных условиях, вызванного таянием обособленного льда, образовавшегося в результате сильного похолодания. В таблице 8.9 представлены руководящие указания по выбору скорости подъема или класса восприимчивости к морозу, чтобы уменьшить потенциальное повреждение системы почва – дорожное покрытие.

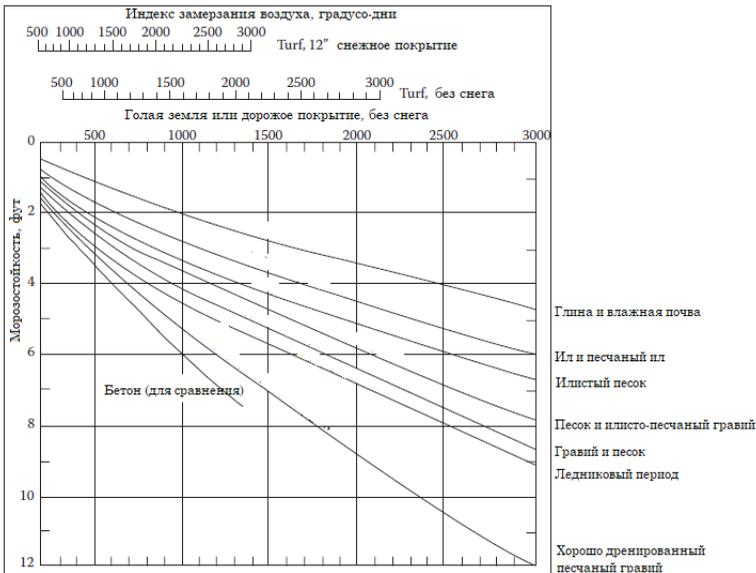


Рисунок 8.13. Взаимосвязь между морозостойкостью, индексом заморозки воздуха и условиями покрытия поверхности (по Sanger, F. J. [1963], Proc. Int. Conf. on Permafrost, NAS-NRC Publ. 1287; TRB [1974], Roadway Design in Seasonal Frost Areas, NCHRP, Synthesis of Highway Practice 26, TRB, 104 p. Это материал является собственностью правительства США, но находится в свободном доступе и не подлежит защите авторских прав).

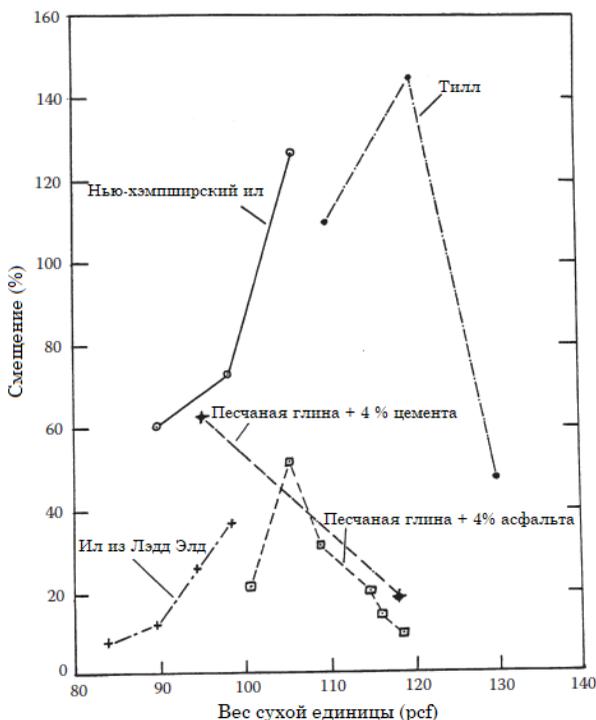


Рисунок 8.14. Влияние типа почвы и удельного веса на смещение (данные из: Winn, H. F. and Rutledge, D. C. [1940], Frost action in highway bases and subgrades, Engineering Bulletin, Purdue University Engineering Experiment Station, v. 24, n. 2, 100p.; Haley, J. F. and Kaplar, C. W. [1952], Cold-room studies of frost action in soils, HRB Special Report 2, pp. 246–267. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не защищен авторскими правами).

8.7.2.4. Индекс замерзания

Индекс замерзания (F) — это количество дней с температурой между самой высокой и самой низкой точкой на кривой градусы–дни в зависимости от времени для периода замерзания. Он используется как мера общей продолжительности и величины температур ниже нуля, наблюдающихся в течение любого сезона замерзания. Индекс, определяемый для температур воздуха на высоте 1,5 м над землей, обычно обозначается как индекс замерзания воздуха (F_a), в то время как индекс, определяемый для температур непосредственно ниже поверхности, называется индексом замерзания поверхности (F_s). Средний индекс замерзания (F_m) — это показатель, определяемый на основе средних температур. Период регистрации, за который усредняются температуры, обычно составляет, как минимум, 10 лет, а предпочтительно — 30 лет. Определение индекса замерзания методом, используемым в армии США, показано на рисунке 8.16.

8.7.3. Экологические геотехнические проблемы мерзлых грунтов

8.7.3.1 Геотехнические свойства и проблемы фундамента

Экологические геотехнические проблемы, связанные с мерзлым грунтом, охватывают в основном две общие темы: (1) характеристики свойств почвы и (2) проблемы фундамента, включая несущую способность и допустимую нагрузку. Основные проблемы, связанные с мерзлым грунтом, обсуждали Andersland, Anderson (1978) и Phukan (1985, 1991). Эти проблемы будут дополнительно рассматриваться в разделе 12.7.

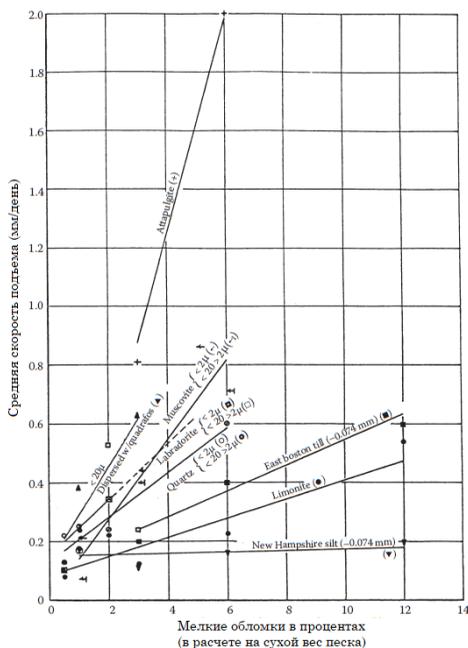


Рисунок 8.15. Влияние песка, добавляемого с различными количествами глинистых минералов и глин, на скорость набухания (по Linell, K. A. and Kaplar, C. W. [1959], The factor of soil and material type in frost action, HRB Bull., v. 225, pp. 23–44. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в общественное достояние и не подлежит защите авторских прав)

В замороженной почве незамерзшая адсорбированная вода может существовать в равновесии со льдом в широком диапазоне температур ниже нуля, как пишет Ноекстра (1969). Адсорбированная вода постепенно замерзает при понижении температуры, уменьшая толщину незамерзшей пленки. Ледяная фаза при каждой температуре находится в равновесии с незамерзшим слоем воды, свойства которого постоянно меняются при понижении температуры. Причиной значительного понижения температуры замерзания незамерзшей воды является наличие способных к обмену ионов, которые при замерзании концентрируются в тонких пленках, и специфические силы адсорбции, исходящие от заряженной поверхности.

Замерзшие почвы практически непроницаемы для ламинарного потока воды, а механизм массопереноса в основном заключается в диффузии в жидкой фазе

(раздел 7.5). Диффузия может происходить под влиянием температурных и внешних градиентов напряжений. Массоперенос происходит через переходный слой между поверхностью частиц почвы и льдом. Помимо массового переноса воды, в мерзлых грунтах также мигрируют ионы. Как правило, технические свойства мерзлых грунтов зависят от температуры – в диапазоне температур от 0 до -10°C , где фазовый состав воды значительно изменяется. Температурная зависимость связана с изменением количества незамерзшей воды. Влияние температуры больше в почвах, которые содержат большое количество незамерзшей воды.

Влияние температуры замерзания и содержания воды для разных почв представлено на рисунках 8.17 и 8.18. При рассмотрении рисунков 8.17 и 8.18 становится понятно, что важную роль играют типы почвы, размер частиц и содержание воды в почве. Количество незамерзшей воды увеличивается в направлении песок \rightarrow ил \rightarrow глина.

Таблица 8.9. Руководство по выбору скорости подъема или класса морозостойкости.

Единая классификация (тип почвы)	Условное обозначение	Процент (<0,02 мм)	Скорость подъема (мм/день)	Классификация морозоустойчивости
Гравий и песок Гравий	GP	0,4	3,0	Средний К низкому От низкого до среднего
	GW	0,7–1,0 1,0–1,5 1,5–4,0 2,0–3,0	0,3–1,0 1,0–3,5 3,5–2,0 1,0–3,0	
Иловая песчаная п. Гравий	и GP-GM			Средний От низкого до среднего
	GW-GM	3,0–7,0	3,0–4,5	
Глиняная илистая п. Гравий	и GM			Средний
	GW-GC	4,2	2,5	
	GM-GC GF	15,0 15,0–30,0	5,0 2,5–5,0	
Пески и щебень Пески Ил и гравий	SP	1,0–2,0	0,8	Очень низкий Средний К низкому
	SW	2,0	3,0	
	SP-SM	1,5–2,0	0,2–1,5	
Пески	SW-SM	2,0–5,0	1,5–6,0	От высокого к очень высокому От высокого до очень высокого
	SM	5,0–9,0	6,0–9,0	
Глина и ил Пески Ил и органика	SM-SC	9,0–22,0	9,0–5,5	Высокий
	SC	9,5–35,0	5,0–7,0	
	ML-OL	23,0–33,0	1,1–14,0	
Илы Глинистые илы Гравийно- песчаная п. Глины	ML	33,0–45,0	14,0–25,0	Очень высокий Очень высокий От высокого до очень высокого
	ML-CL	60,0–75,0	13,0	
	CL	38,0–65,0	7,0–10,0	
Постные глины	CL	65,0	5,0	Высокий Высокий
	CL-OL	30,0–70,0	4,0	
Жирные глины	CH	60,0	0,8	Очень низкий

Источник: по Moulton, L. K. (1991), The Aggregate Handbook, R. D. Barksdale, ed., National Stone Assoc., pp. 12.1–12.93.

8.7.3.2. Проблемы с обледенением

8.7.3.2.1. Обледенение на асфальте

Противогололедная соль считается лучшим вариантом для поддержания чистоты дорожного покрытия. Соль способна растворяться и смешиваться с растаявшим льдом, позволяя воде стекать с проезжей части. Экспериментальные исследования воздействия противогололедных солей на растительную биоту и почву даны в работе Hanes и соавторов (1976). Дальнейшее обсуждение различных аспектов уборки снега и контроля льда на автомагистралях и в аэропортах дано TRB (1979).

8.7.3.2.2. Лед в реке или ручье

Форма льда в текущем потоке называется ледяным бриллиантом. В потоке охлаждение происходит за счет тепловой конвекции и турбулентности в воде, пока поток не станет изотермическим при температуре 39°F. Лед в ручьях сильно влияет на морские или прибрежные сооружения, особенно обломки льда, которые вызывают много проблем для устойчивости для этих структур.

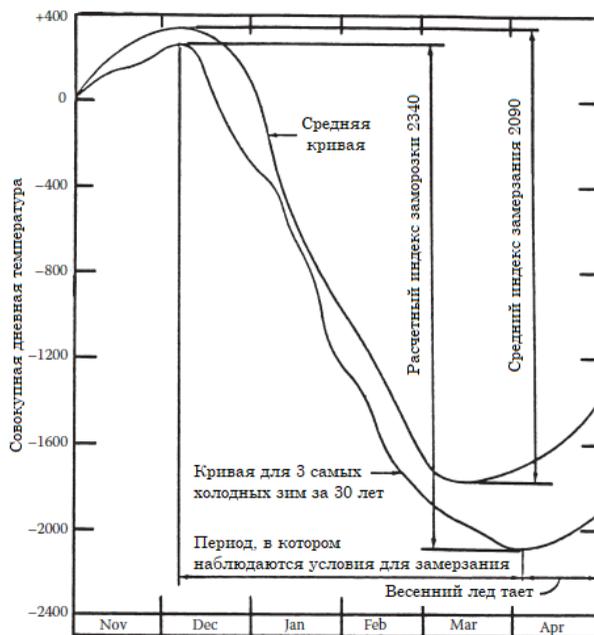


Рисунок 8.16. Определение индекса замерзания по армейской методике США (по Linell, K. A. et al. [1963], Corps of Engineers pavement design in areas of seasonal frost, HRR no. 33, pp. 76–136. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не подлежит защите авторских прав).

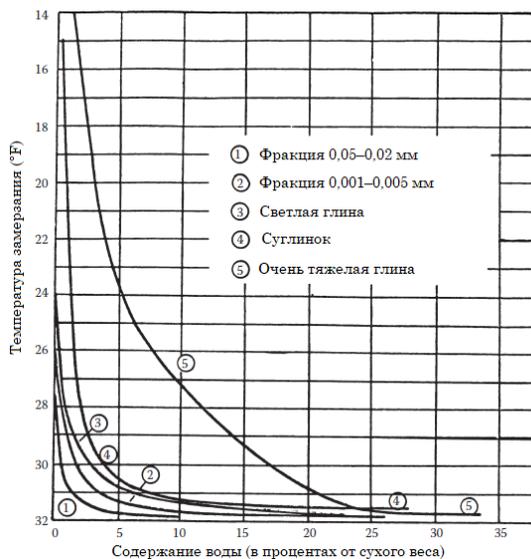


Рисунок 8.17. Влияние температуры замораживания и содержания воды для различных почв

8.7.4. Характеристика оттаивания почвы

8.7.4.1. Общее обсуждение

Циклы замораживания–оттаивания важны для решения различных экологических геотехнических задач, связанных с характеристиками дорожного покрытия, несущей способностью фундаментных конструкций, грузоподъемностью свай, гидравлическими барьерами, а также глиняными вкладышами. Особенности замораживания обсуждались в предыдущем разделе; некоторая дополнительная информация об условиях оттаивания будет предоставлена далее. Среди этих факторов одним из важных параметров является индекс оттаивания, как и индекс заморзания.

Индекс оттаивания (T) – это количество дней в градусах между самой низкой и самой высокой точкой на кривой для кумулятивных градусо-дней в зависимости от времени для одного сезона оттаивания. Он используется как мера общей продолжительности и величины температур заморзания, возникающих в течение любого сезона оттаивания. Индекс, определенный для температуры воздуха на высоте 1,5 м над землей, обозначается как индекс оттаивания воздуха (T_a), а индекс, определяемый для температур непосредственно ниже поверхности, называется индексом оттаивания поверхности (T_s). Средний показатель оттаивания (T_m) – это показатель, определяемый на основе средних температур.

8.7.4.2. Свойства оттаивающей почвы

Когда температура повышается после прохождения точки заморзания, почва начинает оттаивать. В это время прочность почвы уменьшается. Опыт показывает, что вскоре после оттаивания почва под дорожным покрытием теряет свою несущую способность в течение определенного периода времени. Другими

важными параметрами свойств оттаивания почвы являются несущая способность и оседание фундаментных конструкций.

8.8. ХАРАКТЕРИСТИКИ СНЕГА

8.8.1. Общее обсуждение

Снег также является формой воды и напрямую связан с осадками, как отложение кристаллов льда. В снеге обычно присутствует некоторое количество жидкой воды: либо в виде капиллярной воды в промежутках между кристаллами снега, либо в виде молекулярной воды вокруг отдельных кристаллов (раздел 5.3). Термин «содержание воды» относится к жидкой воде в снежном пакете. Качество снега – это весовой процент льда. Снег имеет большую удельную поверхность и находится близко к температуре таяния. Он активен термодинамически и очень чувствителен к местным условиям окружающей среды. Основными проблемами с инженерной точки зрения являются (1) скорость таяния снега и (2) возникновение талой воды. В следующем разделе акцент делается на экологических аспектах поведения снега.

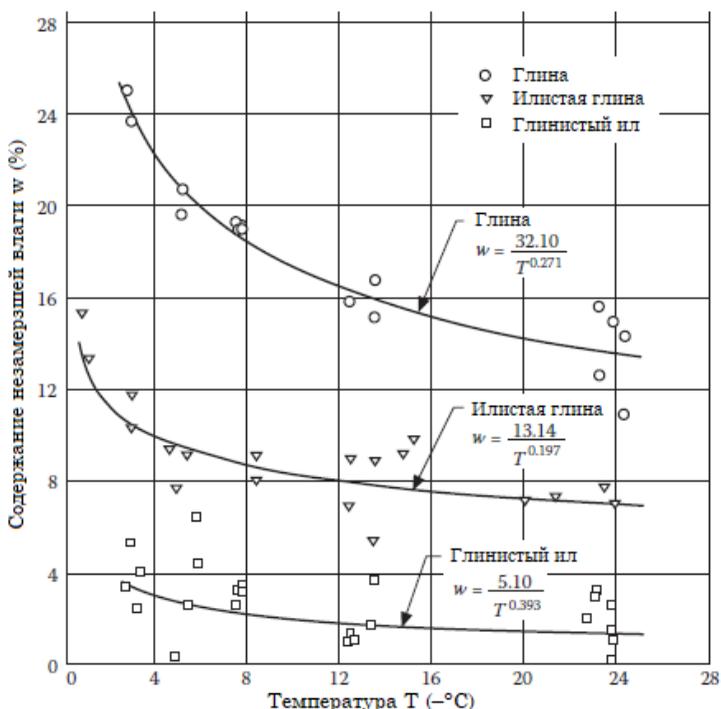


Рисунок 8.18. Содержание незамерзшей влаги в зависимости от температуры в различных типах почвы (по Lovell, C. W. [1957], Temperature effects on phase composition and strength of partially-frozen soil, HRB Bull., v. 168, pp. 74–95. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе. домен и не подлежит защите авторских прав).

Таблица 8.10. Теплопроводность и температуропроводность снега

Плотность снега (г/см ³)	Теплопроводность (кал/см·с °С)	Темперопроводность (см ² /с)
0,12	0,00010–0,00020	0,0016–0,0032
0,16	0,00021–0,00047	0,0026–0,0058

Источник: по Keranen (1929); cited by Winterkorn, H. F. (1953), Macromeritic liquids, ASTM STP 156, pp. 77–89.

8.8.2. Свойства и проблемы снега

Свойства снега имеют непосредственное отношение к большому количеству инженерных задач, связанных с лавинообразованием, подвижностью транспортных средств, уборкой снега и т. д. В таблице 8.10 представлена теплопроводность и температурная проводимость снега. Как обсуждалось в разделе 8.3, температура является мерой внутреннего движения молекул, из которых состоит объект. Однако тепло – это передающаяся тепловая энергия.

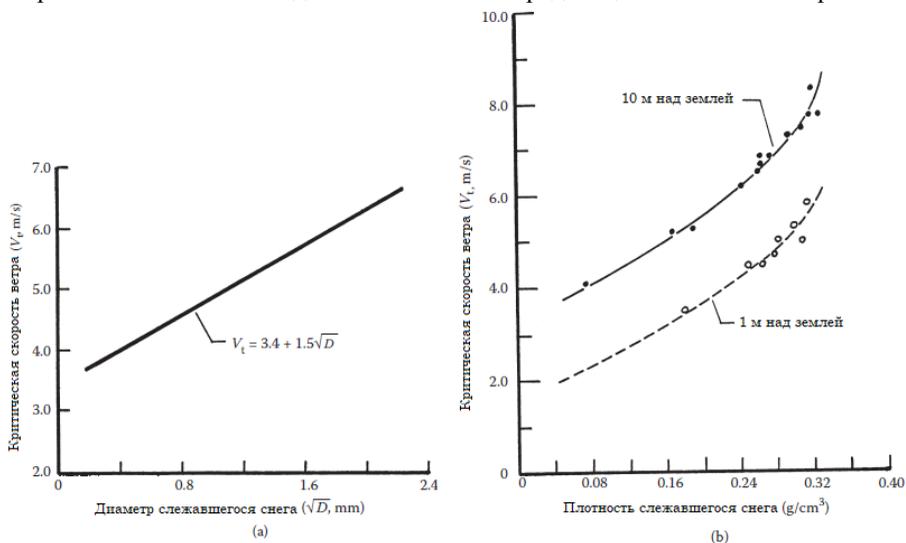


Рисунок 8.19. Характеристики снега: (а) критическая скорость ветра в зависимости от диаметра слежавшегося снега и (б) критическая скорость ветра в зависимости от плотности слежавшегося снега.

Тепло может передаваться из воздуха в снежный покров путем кондукции или конвекции. Скорость ветра также тесно связана с характеристиками снега, как показано на рисунке 8.19, на котором (а) показана скорость ветра в зависимости от квадратного корня из диаметра слежавшегося снега (получена линейная зависимость) и (б) показана скорость ветра на разных высотах в зависимости от плотности слежавшегося снега. Криволинейные отношения обнаруживаются в обоих случаях.

8.9. РЕЗЮМЕ

1. Исследуются свойства теплоты, источников тепла и процессов теплопередачи. Процесс теплопередачи включает в себя кондукцию, конвекцию и излучение в системе почва–вода.

2. Измеряемые тепловые параметры, такие как теплоемкость, удельная теплоемкость и коэффициент диффузии, обсуждаются и суммируются в табличной форме; также представлены типичные данные для каждого случая.

3. Рассматривается воздействие температуры и тепла на геотехнические свойства почвы. Эти свойства включают константы почвы, отношение массы к влаге, сжимаемость, параметры сдвига, влияние поровой воды и т. д. Оцениваются процессы термической обработки и плавления почвы, горных пород и стабилизированной почвы.

4. Влияние сезонных факторов на характеристики системы почва – дорожное покрытие обсуждается с точки зрения прогибов поверхности покрытия, а также с точки зрения прочности его компонентов. Показано, что существует значительная разница как по прогибу, так и по прочности дорожного покрытия между весной и осенью.

5. Инженерные свойства мерзлых грунтов сильно зависят от температуры в диапазоне от 0 до -10°C . Температурная зависимость связана с изменением количества незамерзшей воды. Влияние температуры наиболее заметно в типах почв, которые содержат большое количество незамерзшей воды. Количество незамерзшей воды увеличивается в направлении песок \rightarrow ил \rightarrow глина.

6. Обсуждается практическое применение знаний, относящихся к геотехническим проблемам, таким как проложение подземного кабеля и очистка дорожного покрытия от снега и льда.

ПРОБЛЕМАТИКА

8.1. Четко различайте температуру и теплоту.

8.2. Органическая почва поглощает больше тепла, чем чистый однородный песок? Объясните, почему.

8.3. Может ли глина хранить больше тепла, чем песок? Объясните, почему.

8.4. Если температура воздуха составляет 80°F , то какая его температура в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$) и Кельвина (K)?

8.5. Переведите теплопроводность почвы из $\text{кал/см}\cdot\text{с}\cdot^{\circ}\text{C}$ и из $\text{ватт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$ в $\text{ккал/м}\cdot\text{ч}\cdot^{\circ}\text{C}$.

8.6. Определите следующие термины: (a) плавление, (b) удельная теплоемкость, (c) коэффициент диффузии, (d) излучательная способность, (e) теплоемкость, (f) индекс замерзания, (g) альbedo, (h) теплота сублимации, (i) индекс оттаивания.

8.7. Каковы причины наблюдения сезонных колебаний теплового сопротивления в одних почвах, а не в других?

8.8. Какие ограничения должны соблюдаться при эксплуатации подземных кабельных систем для обеспечения стабильных тепловых условий почвы?

8.9. Какой диапазон эффективных значений удельного теплового сопротивления применяется в разных частях страны? Как эти значения должны быть скорректированы для разных глубин захоронения и для изменения климатических условий?

8.10. Очень мелкий песок и ил являются почвой, наиболее подверженной пагубным воздействиям морозов. Объяснить, почему.

9. Электрические свойства почв

9.1. Введение

Электрическая энергия, существующая в системе почва–вода, играет важную роль, как описано в разделе 2.9 и показано на рисунке 2.3. Вся другая энергия, такая как механическая, тепловая или магнитная, зависит от характеристик электрической энергии. Электрические характеристики почвенно-водной системы имеют многофазность по следующим причинам.

1. Как почва, так и вода унаследовали электрические характеристики, как обсуждалось в главах 4 и 5.

2. Электрическая энергия тесно связана с тепловой и магнитной энергиями, и ее трудно разделить в естественной среде.

3. Электрохимическое взаимодействие в системе почва–вода чувствительно к местной среде, и во многих случаях эти взаимодействия не совсем понятны. Величина и поведение электрических свойств в системе почва–вода не могут быть эффективно измерены.

4. Некоторое взаимодействие между почвой и электричеством в окружающей среде также не совсем понятно, и теоретический подход иногда упрощается. Различия между теорией и экспериментальными наблюдениями существенно различаются.

Понимание характеристик электрических свойств почвенно-водной системы способствует нашим знаниям для: (1) дальнейшего понимания причин прогрессирующих отказов, эрозии и оползней; (2) разработки более эффективных методов укрепления грунта; (3) совершенствования более эффективного подхода к дезактивации почвы электрокинетическими и электромагнитными процессами.

В почвенно-водной системе существуют различные типы электрических источников, включая как естественные, так и искусственные. В этой главе основное внимание уделяется характеристикам искусственного электрического тока, применяемого к мелкозернистым почвам.

9.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧАСТИЦ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

9.2.1. Общее обсуждение

Основные характеристики частиц обсуждались в разделе 2.2. В этом разделе обсуждаются частицы, взаимодействующие в системе почва–вода–электричество.

Обычные атомы являются нейтральными, то есть они не несут электрический заряд. Однако при определенных обстоятельствах атомы могут стать электрически заряженными. Такие заряженные атомы называются ионами. Некоторые элементы образуют положительные ионы, называемые катионами, а некоторые образуют отрицательные ионы, называемые анионами. Поскольку атомы способны образовывать ионы, они также содержат основные единицы отрицательного заряда, которые могут быть потеряны с образованием положительных ионов или приобретены с образованием отрицательных ионов. Эти единицы заряда являются теми же единицами заряда, которые характеризуют электричество. Такие единицы отрицательных зарядов известны как электроны. Положительный заряд необходим для нейтрализации отрицательных электронов в нейтральном атоме. Такая положительная субатомная частица, присутствующая в

атоме, называется протоном. Если субатомная частица не несет электрического заряда (то есть она нейтральна), то ее называют нейтрон. Основные типы частиц, которые служат строительными единицами материи, представлены в таблице 2.1.

9.2.2. Электрическое поле и электрический заряд

Электрическое поле – это состояние в пространстве, создаваемое электрическими зарядами, на которое реагируют другие электрические заряды. Электрический заряд является входной энергией. Есть два вида зарядов: положительный и отрицательный. Положительный заряд в обычной материи переносится протонами, отрицательный заряд – электронами. Заряды одного знака отталкиваются друг друга, заряды противоположных знаков притягивают друг к другу. Чистый заряд равен общему положительному заряду минус общий отрицательный заряд. Согласно *принципу сохранения заряда*, суммарный электрический заряд в изолированной системе всегда остается постоянным. Основной единицей электрического заряда является заряд электрона (e^-):

$$e^- = 1.602 \times 10^{-19} \text{ Кл (кулон)} \quad (9.1)$$

Электрон-вольт (эВ) является единицей энергии. Если частица, несущая заряд (e^-), ускоряется из состояния покоя через разность потенциалов 1 В, она приобретает кинетическую энергию 1 эВ:

$$1 \text{ эВ} = 10^{-6} \text{ МэВ} \\ = 1,60 \times 10^{-19} \text{ Дж} \quad (9.2)$$

9.3. ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ В СИСТЕМЕ ПОЧВА–ВОДА–ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

9.3.1. Общее обсуждение

Из базовой физики мы узнаем, что если для перемещения одного кулона (Кл) положительного заряда из одной точки в другую требуется один джоуль (Дж) работы, то разность потенциалов между двумя точками составляет один вольт (В). Мера электрического тока – это количество заряда, которое проходит определенный отрезок за единицу времени. Если 1 Кл заряда проходит отрезок за 1 с, ток определяется как 1 А. В таблице 9.1 приведены измеримые электрические параметры, определения, вычислительные формулы и единицы измерения. Некоторые общие термины, часто используемые в этом тексте, кратко объясняются следующим образом.

9.3.2. Электродвижущая сила и сопротивление

9.3.2.1. Электродвижущая сила

Электродвижущая сила (ЭДС) определяется как любая сила, которая может привести к движению электрических зарядов и тем самым вызвать электрический ток. Батарея является типичным примером источника ЭДС. ЭДС также может генерироваться из тепловой или электромагнитной энергии. Единица измерения

ЭДС – см-вольт. Также следует отметить, что «электродвижущая сила» является вводящим в заблуждение термином, поскольку ЭДС относится к величине, относящейся к энергии, а не к силе. Именно по этой причине в качестве обычной практики делается указание только на аббревиатуру ЭДС или на символ E , а не на неправильное словосочетание «электродвижущая сила» (Tilley и Thumm, 1971).

9.3.2.2. Сопротивление

Свойство электрической цепи, имеющей тенденцию предотвращать протекание тока и в то же время вызывать преобразование электрической энергии в тепловую энергию, называется сопротивлением (R). Ом (Ω) является практической единицей сопротивления и определяется, как показано в таблице 9.1.

9.3.3. Проводимость, конденсатор и емкость

9.3.3.1. Проводимость

Проводимость (g) является обратной величиной сопротивления (R) и может быть определена как свойство цепи или материала, который допускает протекание электрического тока (I). Единица проводимости является обратной величиной по отношению к ому ($1/\text{ом}$ или мо).

9.3.3.2. Конденсатор

Конденсатор – это система, которая накапливает энергию в форме электрического поля. Конденсатор состоит из пары параллельных металлических пластин, разделенных воздухом или другим изолирующим материалом. Разность потенциалов (V) между пластинами конденсатора прямо пропорциональна заряду (Q) на любой из них, поэтому отношение (Q/V) всегда одинаково для конкретного конденсатора.

Таблица 9.1. Сводка измеряемых электрических параметров, их определение, вычислительные формулы и единицы

Параметр	Определение или формула	Единицы
Ток (I)	Заряд (Q) / время (t) $I = Q/t$	1 (А) = 1 (С/с)
Напряжение (V)	Работа (Вт) / заряд (Q) $V = W/Q$	1 (В) = 1 (Дж/С)
Сопротивление (R)	Напряжение / ток $R = V/I$	1 Ом = 1 В/А
Мощность (P)	Работа (W) / время (t) $P = W/t = VI = I^2R$	1 (Вт) = 1 (Дж/с)
Удельное сопротивление (ρ)	$R = \rho L/A^a$	Ом-метр или $\Omega\cdot\text{м}$
Проводимость (g)	$g = 1/R$	$\text{мо} = 1/\text{ом} = \Omega^{-1}$
Удельная проводимость или проводимость (γ)	$g = \gamma A/L^a$	$\text{мо/м}, \Omega^{-1}/\text{м}$
Емкость (C) ^a	Заряда (Q) / напряжение (V) $C = Q / V$	1 (Ф) = 1 С/В

Примечание: А – ампер; С – кулон; J – джоуль; s – секунда; F – фарад.

^a А – площадь поперечного сечения; L – длина проводника; C – емкость (см. текст).

9.3.3.3. Емкость Емкость (C) является отношением Q/V . Единицей емкости является фарад (F), получается, что $1 F = 1 C/V$. Поскольку фарад слишком велик для практических целей, обычно используются микрофарад и пикофарад:

$$1 \text{ микрофарад} = 1 \text{ F} = 10^{-6} \text{ F}$$

$$1 \text{ пикофарад} = 1 \text{ F} = 10^{-12} \text{ F} \quad (9.3)$$

9.4. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОХИМИИ ПОЧВ

9.4.1. Общее обсуждение

Основная концепция электрохимии была создана в 1834 году Майклом Фарадеем, который открыл фундаментальный закон электролиза. Однако применение этой концепции в технике является относительно новым междисциплинарным предметом. Это сочетание химии, физикохимии, инженерии и их взаимодействия с электричеством и окружающей средой.

Прогресс в развитии почвенной электрохимии также зависит от развития других смежных тем, таких как минералогия глины, ионообменная способность почвы, электродная реакция, электролиз, электролиты и окислительно-восстановительная реакция. Некоторые из этих аспектов обсуждались в главах 4 и 5, а некоторые дальнейшие обсуждения будут представлены в этой главе.

9.4.2. Почвенно-электрохимическое взаимодействие и его измерение

Почво-электрохимическое взаимодействие является сложным процессом. Схема, иллюстрирующая взаимодействие с окружающей средой, представлена на рисунке 9.1. Химические формулы, описанные на рисунке, получены от Reuss (1978). Некоторые из элементов, указанных на рисунке 9.1, обсуждались в предыдущих разделах, например обычные дожди и кислотные дожди (раздел 5.4), инфильтрация и перколяция (раздел 7.3), сорбированные ионы (раздел 4.6), процессы сорбции (раздел 6.4) и почвенные растворы (раздел 5.3).

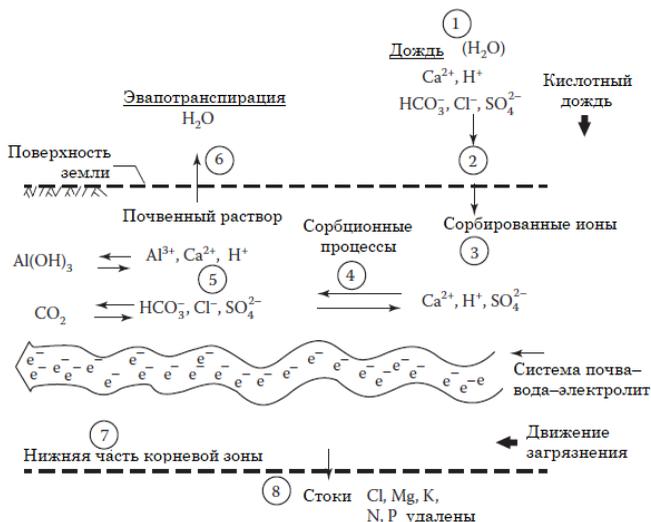


Рисунок 9.1. Влияние электрохимии взаимодействия почва–вода в окружающей среде

9.4.2.1. Эвапотранспирация

Процесс суммарного испарения является частью энергетического обмена. Вихревое движение – это основной механизм, с помощью которого водяной пар удаляется из мест произрастания растений или с испаряющихся поверхностей. В общем, испарение считается процессом переноса массы, аналогичным переносу тепла. Движение влаги в зоне укоренения и взаимодействия почва–корень–лист вызвано электроизолирующими и термоэлектрическими эффектами, как обсуждалось в разделах 5.6 и 5.7.

9.4.2.2. Выщелачивание

Выщелачивание вызвано дождевыми или дренажными процессами из-за того, что некоторые глинистые минералы удаляются естественным путем. В процессе выщелачивания удаляются обычные минеральные элементы, такие как кальций (Ca), магний (Mg), калий (K), азот (N) и фосфор (P). Поскольку большая часть кальция теряется, азот выщелачивается из почв в форме нитратов (NO_3). Количество фосфора, потерянного в результате дренажа, невелико, но в дренажных водах можно найти сравнительно большое количество серы (S).

Если в систему почва–вода подается дополнительный электрический ток и/или загрязненная вода проникает в систему почва–вода, как показано на рисунке 9.1, то усложнение взаимодействия почва–вода–электричество значительно возрастает. Дальнейшее обсуждение этого аспекта будет в следующих разделах.

9.4.3. Электрод и ячейка

Электрод состоит из двух кусков металла, которые соединяются с электронным насосом (например, аккумулятором) и погружаются в раствор, содержащий ионы; катионы притягиваются к отрицательному куску металла, а анионы – к положительному. В этом состоянии куски металла называются электродами. Электрод, который притягивает катионы, называется катодом (–), а электрод, который притягивает анионы, называется анодом (+). Устройство такой системы называется ячейкой (рисунок 9.2). Процесс подчинения раствора условию, которое вызовет электродную реакцию, называется *электролизом*.

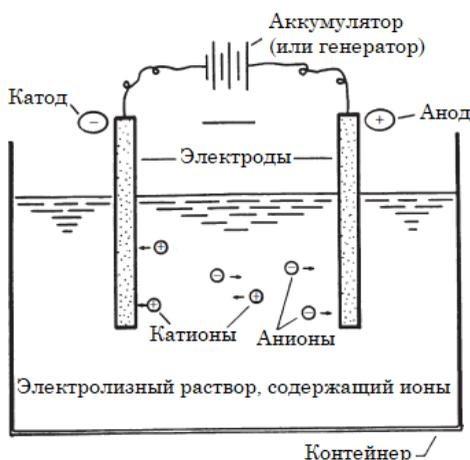


Рисунок 9.2. Типичная установка электролизного аппарата.

9.4.4. Электролиз

Итак, процесс подчинения раствора условию, которое вызовет электродную реакцию, называется электролизом. Основной закон электролиза был открыт М. Фарадеем в 1834 году. Ученый изложил свое открытие в виде двух законов.

9.4.4.1. Законы Фарадея

1. Первый закон: «Химическая сила тока электричества прямо пропорциональна абсолютному количеству электричества, которое проходит».

2. Второй закон: «Несколько веществ были помещены последовательно и разложены одновременно одним и тем же электрическим током <...> результаты были сопоставимы: олово (Sn), свинец (Pb), хлор (Cl), кислород (O) и водород (H) эволюционировали, будучи определенными по количеству и электрохимическими эквивалентами друг другу».

3. Объединение законов Фарадея (первого и второго) в один закон выглядит следующим образом: «Число эквивалентных весов любого вещества, осажденного или выделившегося на электроде, пропорционально количеству электричества, проходящего через электролит, то есть вещество, которое подвергается электролизу».

9.4.4.2. Блок Фарадея

Количество электрического заряда, связанного с 1 моль электронов, называется фарадеем. Приведем отношения между фарадеем и другими обычно используемыми единицами:

$$1 \text{ фарадей} = 1 \text{ моль электронов} = 96\,500 \text{ Кл} \quad (9.4)$$

9.5. ЭЛЕКТРОЛИТЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ

9.5.1. Характеристики электролитов

Вещества, которые образуют ионы в водном растворе, называются электролитами. Некоторые вещества, которые полностью ионизируются, называются сильными электролитами. Другие, ионизированные незначительно, называются слабыми электролитами. Вещество, образующее водный раствор, который не проводит электричество, называют неэлектролитом. Многие молекулярные вещества, такие как сахар ($C_{12}H_{22}O_{11}$) и спирт (C_2H_5OH), являются неэлектролитами. Некоторые важные электролиты обсуждаются далее.

9.5.1.1. Соли и основания

Большинство солей являются сильными электролитами. Например, сильными электролитами являются $NaCl$, NH_4NO_3 , KBr , $CaCl_2$ и Na_2CO_3 . Соли, такие как $AgCl$, не дают растворов с высокой проводимостью, потому что они имеют очень низкую растворимость. Однако небольшое их количество в растворе полностью диссоциирует на ионы.

Все растворимые гидроксиды металлов (ОН) являются сильными электролитами. Например, сильными электролитами являются $NaOH$, KOH и $Mg(OH)_2$. Однако основания, такие как NH_3OH и амины, имеют тенденцию быть слабыми. Самым сильным основанием, которое может существовать в воде, является OH^- , поскольку любой более сильный ион амида является примером такого основания. Некоторые кислоты являются сильными электролитами, другие – слабыми. Большинство кислот находятся где-то между двумя крайними точками.

9.5.1.2. Природные электролиты: кислотный дождь и кислотный дренаж

Как говорилось в разделе 1.6, кислотные дожди являются основной частью взаимодействия почвы и воды в окружающей среде, потому что кислотные дожди вместе с кислотными дренажами являются природными электролитами (раздел 5.4), которые будут влиять на реакции ионного обмена и, следовательно, повлияют на поведение системы почва–вода–электролит.

9.5.2. Электрод и окислительно-восстановительные реакции

9.5.2.1. Электродная реакция

Электродные реакции на самом деле являются химическими реакциями, включающими перенос электрона. Реакция, при которой молекула теряет или приобретает электроны на электроде и превращается в новую молекулу, называется электродной реакцией. Электродная реакция происходит только тогда, когда одновременная реакция, включающая усиление электронов, происходит в системе на другом электроде.

9.5.2.2. Окислительно-восстановительная реакция

Все химические элементы могут принимать или жертвовать электроны. Если элемент теряет электроны, это называется окислением, а, если он получает электроны, это называется восстановлением. Окисление и восстановление всегда происходят вместе, потому что вещество может пожертвовать электроны, только если другое вещество может их принять, и наоборот. Реакция, включающая окисление и восстановление, называется реакцией окисления–восстановления или окислительно-восстановительной реакцией.

9.5.2.3. Окислительно-восстановительный потенциал

Окислительно-восстановительный потенциал является измерением интенсивности. Он измеряет доступность, а не количество электронов. Поскольку окислительно-восстановительный потенциал определяется потенциальной скоростью донорства электронов в сравнении со скоростью акцептации электронов, это также является грубой оценкой количества присутствующих доноров электронов. Многие химические реакции неорганических почв являются биологическими реакциями углерода, азота и серы, которые являются окислительно-восстановительными реакциями. Большинство окислительно-восстановительных реакций также переносят ионы Н. Значение Н и e в химических реакциях в почве во многом зависит от наличия или отсутствия кислорода. Кислород обычно доступен в большинстве вод для корней растений и микробов.

9.5.3. Характеристики E_h и pe и их взаимосвязь

Электрод, электрон, обратимые и равновесные потенциалы, а также электронная активность – все это тесно связанные термины для равновесного потенциала электрона. Электронный потенциал или электродный потенциал обычно ассоциируется с термином E_h , тогда как электронная активность связана с термином pe .

E_h зависит от значения рН и парциальных давлений Н и О. В целом, график зависимости E_h от рН полезен для оценки характеристик загрязненных почвенно-водных систем. Поскольку все биологические и почвенные системы содержат

воду, их окислительно-восстановительная область является областью стабильности воды (рисунок 1.4). Диаграммы pe и pH могут использоваться для изображения электрохимических равновесий. Значения pe находятся в диапазоне от 20 до 78 в условиях сильного окисления. Связь между pe и E_h при 25°C предложили Bohn и его соавторы (1985):

$$E_h = 0,059 (pe) \quad (9.5)$$

В почвенно-водной системе реакции органического окисления и метанового брожения, нитрификации и денитрификации относятся к этому типу и опосредуются бактериями (раздел 5.9). Кроме того, такие загрязнители, как кадмий (Cd), ртуть (Hg), мышьяк (As) и свинец (Pb), часто встречаются в загрязненных почвенно-водных системах. Кадмий широко используется в производстве аккумуляторов, красок и пластмасс. Кроме того, он используется в производстве различных конструктивных элементов, таких как болты, гайки и пластины. Ртуть является одним из самых проблемных тяжелых металлов, обнаруженных во многих почвенно-водных системах. Большая часть недавних исследований, касающихся токсичности ртути, была связана с метилированными соединениями ртути. На рисунке 9.3 показаны соединения ртути (Hg) и мышьяка (As), существующие в системе почва-вода в различных условиях окружающей среды, что отражается в значениях E_h . При рассмотрении рисунка 9.3а, когда pH изменяется от 8,00 до 8,75, значение E_h изменится с 330 до 420 мВ. Другие элементные загрязнители, такие как мышьяк (As), существуют в почвенно-водных системах и при различных значениях pH образуют еще более сложные формы соединений мышьяка, как писал Wang (1985).

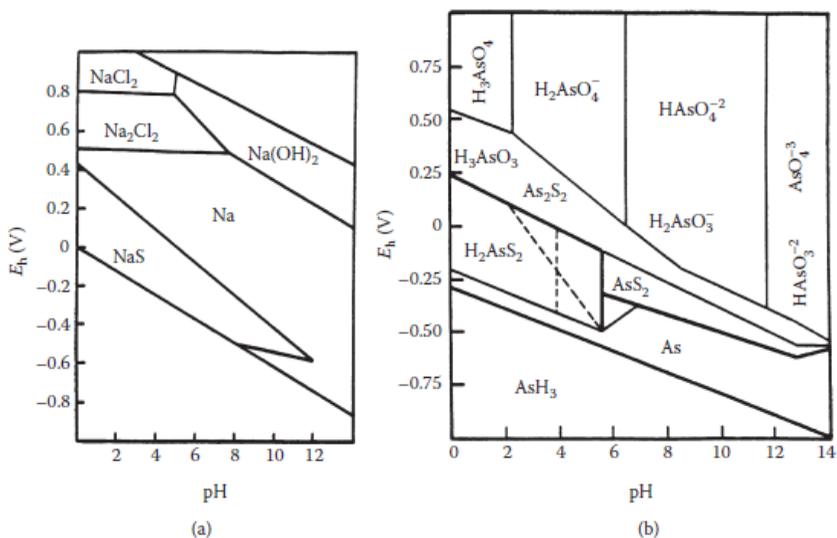


Рисунок 9.3. Формы тяжелых металлов, присутствующие в почвенно-водных системах в различных условиях окружающей среды в соответствии с окислительно-восстановительными реакциями: (а) ртуть (Hg), (b) мышьяк (As). (По Wang, Н. Т. [1985], Water Pollution, Scientific Publishing, Beijing.)

9.6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВЫ, ВОДЫ И КАМЕННОЙ ГОРНОЙ ПОРОДЫ (ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ)

9.6.1. Механизм взаимодействия почва–электричество

Целью подачи дополнительного электрического тока в массу почвы является идентификация и/или характеристика свойств воды, почвы и породы, потому что реакции электричества будут отражать их поведение. Взаимодействие между почвой и электричеством зависит от размера частиц почвы, минеральных структур, состояния минеральной поверхности и характеристик поровой жидкости, а также ионообменной емкости и свойств электролитов, как обсуждалось в разделах 4.6 и 4.8. На рисунке 9.4 показано, что направление движения ионов, в общем, следует направлению электрического тока, а область влияния (поле электрической энергии) связана с величиной электрического заряда и характеристиками почвенно-водной системы. Кроме того, есть два отличных друг от друга случая взаимодействия почвы и электричества.

1. Состояние сухой почвы: когда почва сухая, удельное электрическое сопротивление, как правило, очень высокое, поскольку существует очень слабое взаимодействие между электрическим зарядом (входной энергией) и ионами, существующими в почве.

2. Влажное состояние почвы: для влажной почвы электричество увеличивается, а удельное сопротивление значительно уменьшается из-за влажной пленки вокруг частиц почвы, которая служит мостом, связывающим электрический заряд (e^-) и ионы, присутствующие в почве.

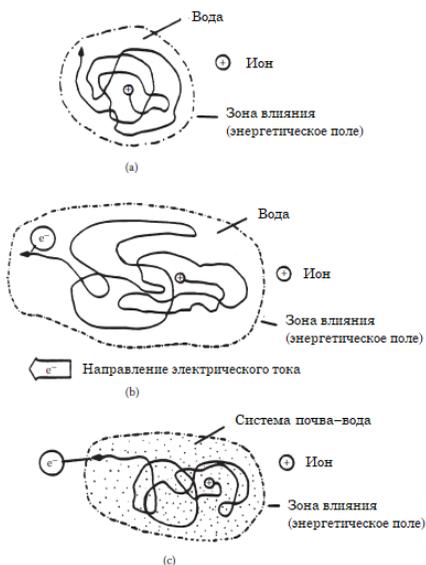


Рисунок 9.4. Движение ионов в системе почва–вода: (а) ион в воде (без электричества – броуновское движение); (б) ион в воде при подаче электроэнергии; (с) ион в почвенно-водной системе при подаче электроэнергии.

9.6.2. Свойства, измеряемые электрическим током и напряжением

Измеряемые электрические параметры, такие как электрический ток, заряд, удельное сопротивление или проводимость, часто используются для определения как лабораторных, так и натуральных свойств почвы и воды. Некоторые типичные экспериментальные результаты, основанные на этих параметрах для практического использования в геотехнической инженерии, представлены далее.

9.6.2.1. Свойства почвы и воды

Электрический ток (I) представляет собой соотношение между электрическим зарядом (Q) и временем (t) и может использоваться для определения характеристик почва–вода. Рисунок 9.5а показывает электрический ток в зависимости от времени для почвы, воды и хлорида калия (KCl). Во всех случаях электрический ток уменьшается с увеличением продолжительности времени. На рисунке 9.5b показано уменьшение тока при увеличении напряжения для всех случаев с различными условиями для почвы и воды.

9.6.2.2. Обнаружение протечки чере геомембранный экран

Использование напряжения для определения местоположения источников утечки геомембранных вкладышей было разработано Darilek and Parra (1988) из Юго-Западного научно-исследовательского института, Сан-Антонио, Техас. Спонсором проекта выступила Лаборатория инженерных исследований опасных отходов США.

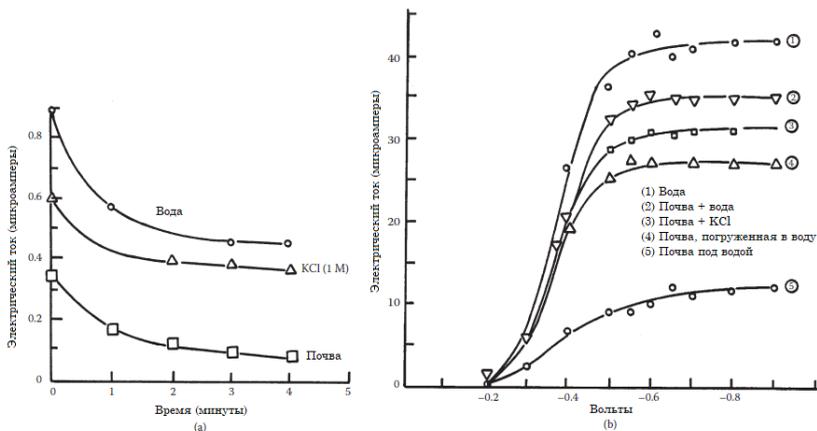


Рисунок 9.5. Характеристики почвы, измеренные электрическим током: (а) электрический ток в зависимости от времени, (б) электрический ток в зависимости от напряжения (по Yu, T. Y. and Chiang, H. Y. [1984], *Electro-Chemical Properties of Soils*, Scientific Publishing, Beijing).

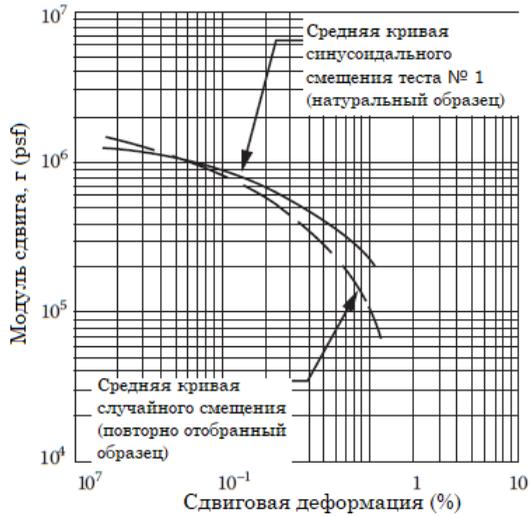
9.6.2.3. Репликация почвенной ткани с использованием фактора формирования

Фактор условий образования (F) является безразмерным параметром, основанным на проводимости системы поровой жидкости. Этот параметр был разработан для описания характеристик структуры почвы (Archie, 1942). Фактор

условий образования определяется как отношение проводимости электролита (вода + соль), занимающего поровое пространство насыщенного образца почвы, к проводимости смеси почва–электролит. Этот параметр был использован для количественной оценки и прогнозирования пористости, формы, анизотропии и цементации почвы как в полевых условиях, так и в лаборатории (Archie, 1952; Arulanadan и Dafalias, 1979; Harig и Chaney, 1999, 1998, 2000; Mulilis, 1975). Исследования показали, что для песчаного материала соотношение между фактором условий образования и плотностью является линейным для четырех различных методов уплотнения для относительных плотностей между 30 % и 90 %. Показано, что фактор условий образования увеличивается методом переупорядочивания в следующем порядке:

- 1) плювиация по воздуху (самая низкая величина F);
- 2) горизонтальные высокочастотные колебания (сухие);
- 3) влажная трамбовка;
- 4) горизонтальные высокочастотные колебания (влажные) (максимальная частота).

Кроме того, Mulilis (1975) также показал, что коэффициент циклического напряжения, вызывающий начальное ожижение, увеличивается с увеличением фактора условий образования. Chaney (1995) определил данный фактор на невозмущенном образце илового песка, а затем провел испытание на циклическом модуле упругости с произвольным смещением. Затем он подготовил отлитый образец, используя технику разминания / вибрации, которая дала тот же коэффициент формирования, что и у ненарушенного образца. За этим последовало еще одно испытание на циклическом трехосном модуле на повторно отформованном образце. Результаты этих двух испытаний продемонстрированы на рисунке 9.6. Рисунок 9.6 показывает, что результаты испытаний на ненарушенном и перенастроенном состоянии очень близки.



Примечание: 1 psf = 994 кПа.

Рисунок 9.6. Сравнение модуля случайного и синусоидального смещения и кривых демпфирования, ML, масса сухого блока = 16,5 кН/м³, w = 17,3 % и эффективное давление = 145 кПа (Chaney, R. [1995], Proc. Third Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, v. 1, St. Louis, MO, pp. 65–70. Перепечатано с разрешения R. Chaney).

9.6.3. Электрический заряд и плотность поверхностного заряда

9.6.3.1. Характеристики электрического заряда в почвенно-водной системе

Чистый заряд – это сумма положительных и отрицательных зарядов. В почве отрицательный заряд, как правило, больше, чем положительный заряд, за исключением областей с повышенной кислотностью, где большая часть почвы несет отрицательный заряд. Катионообменная способность почвы существует в большинстве почв при определенных условиях pH, потому что катионообменная емкость обычно находится там, где $pH = 7,0$. pH может влиять на обменные отрицательные заряды в почве, но не влияет на постоянный отрицательный заряд (Schofield, 1949). В большинстве почв pH менее 5,5. На рисунке 9.7 показано влияние значения pH на электрический заряд красной латеритной глины с юго-запада Китая (Yu, 1964).

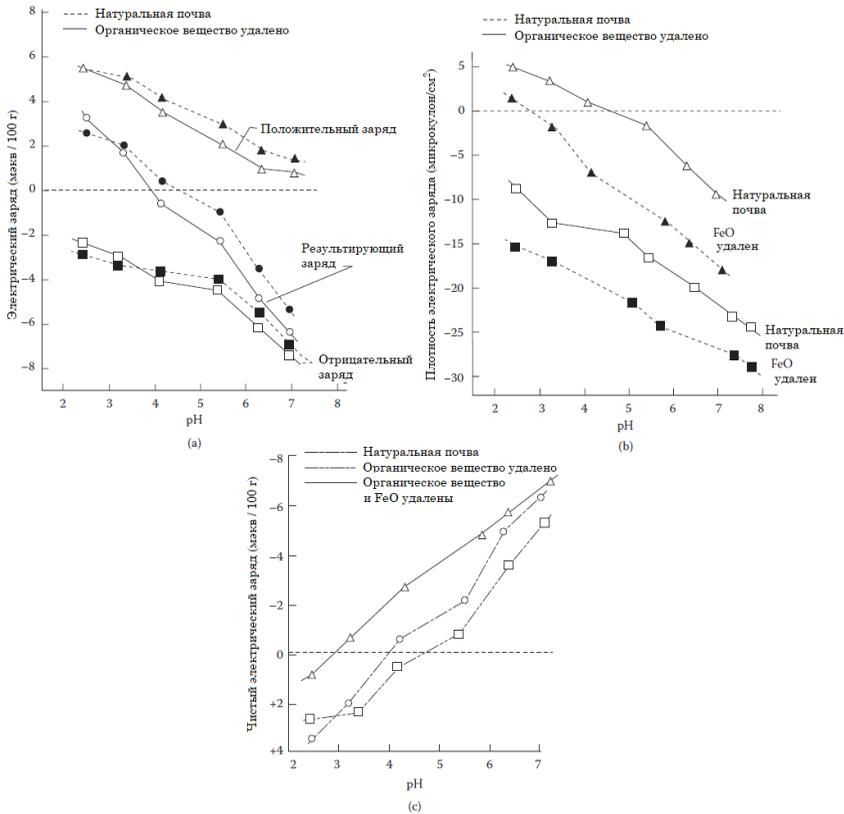


Рисунок 9.7. Влияние значения pH на электрический заряд красной латеритной глины: (a) электрический заряд; (b) чистый заряд; (c) плотность заряда (по Yu, T. Y. [1964], *Electro-Chemical Properties of Soils*, Scientific Publishing, Beijing).

9.6.3.2. Влияние электрической поверхностной плотности на почвенно-водную систему

В таблице 9.2a приведены экспериментальные данные об отрицательном электрическом заряде для частиц почвы размером более 1 мм при $pH = 7,0$. В таблице 9.2b представлена сводка влияния pH на поверхностную электрическую плотность красной латеритной глины.

9.6.4. Удельное электрическое сопротивление почвы, горных пород и воды

9.6.4.1. Общее обсуждение

Использование электросопротивления является наиболее распространенным методом измерения характеристик почвенно-водных систем, а также инженерных свойств системы почва – горная порода. Области применения могут быть сгруппированы следующим образом.

1. Воздействие окружающей среды на характеристики почвы или воды через температуру и содержание влаги.
2. Механические свойства почвы, такие как удельный вес, пористость, модуль Юнга и параметры прочности почвы или породы.
3. Глубина замерзания (мерзлые или незамерзшие почвы) или местоположение уровня грунтовых вод.
4. Обнаружение подземных материалов (таких как гравий, песок и почвенные отложения), а также провалов или других полостей.
5. Обнаружение заглубленных геоструктурных элементов, таких как трубы, сваи, а также опасные или токсичные отходы.
6. Обнаружение утечек в геомембранных вкладышах.

9.6.4.2. Почва и горные породы

Использование удельного электрического сопротивления для измерения свойств почва–порода требует инъекции электрического тока в почву (или землю) с помощью пары поверхностных электродов. Удельное сопротивление зависит от содержания влаги и температуры материалов. Когда содержание влаги и/или температура увеличивается, удельное сопротивление уменьшается. Удельное сопротивление также связано с физическими или механическими свойствами почвы или породы. Keller (1974) сообщил о корреляции между модулем Юнга и электрическим удельным сопротивлением для образцов горных пород. На рисунке 9.8 показано определение глубины замерзания с помощью измерений электрического сопротивления из дорожного теста AASHTO в Оттаве, Иллинойс. Рисунок 9.8a показывает температуру земли в зависимости от электрического сопротивления. Рисунок 9.8b изображает электрическое сопротивление в зависимости от глубины подземного слоя почвы. Электрическое сопротивление может быть использовано для определения того, заморожен ли грунт или нет.

Таблица 9.2а. Поверхностная электрическая плотность красной латеритной глины в зависимости от минерального состава

Типы почв и местоположения	рН		Отрицательный электрический заряд, мэкв / 100 г	Минеральный состав
	H ₂ O	KCl		
Красновато-коричневые латеритные почвы (Кантон)	5,0	4,8	5,2	Каолинитовая группа
Красная глина из гранита (Кантон)	4,8	4,2	12,0	Каолинитовая группа
Красная глина (центральная часть)	4,8	4,1	22,0	Каолинит, иллит и их смеси
Лёсс (центральная часть)	7,0	6,1	40,0	Иллит, монтмориллонит и их смеси
Тропическая почва (остров Хайнань)	7,2	6,3	53,5	Мономориллонитовая и каолиновая группы
Черноземы (внутренняя Монголия)	–	–	91,0	Монтмориллонит

Таблица 9.2б. Поверхностная электрическая плотность красной латеритной глины, связанная со значением рН

Окисол (4 век) Красная латеритовая глина		Красновато-коричневый латерит Почвы (латеризованные почвы)	
рН	Поверхностная плотность	рН	Поверхностная плотность
4,9	-13,3	2,4	+4,6
6,5	-19,6	5,4	-1,4
7,3	-22,9	6,3	-6,1
7,7	-24,0	7,0	-9,0
FeO удален из натуральной почвы			
5,1	-21,3	2,4	+1,8
5,7	-24,2	4,2	-6,7
7,3	-27,4	6,3	-14,9
7,7	-28,8	7,1	-17,7

Примечание: (1) единица измерения поверхностной электрической плотности: микрокулон/см²; (2) (-) отрицательный электрический заряд; (+) положительный электрический заряд.

Источник: по Yu, T. Y. (1964), *Electro-Chemical Properties of Soils*, Scientific Publishing, Beijing.

9.6.4.3. Качество воды, измеренное с помощью электрического сопротивления / проводимости

Одной из распространенных практик использования удельного электрического сопротивления или проводимости является определение солёности и кислотности почвы и воды. Для определения электропроводности в раствор помещают два электрода постоянной геометрии, включая постоянное расстояние разделения. Когда возникает электрический потенциал, величина тока изменяется непосредственно в зависимости от общей концентрации растворённых солей. При постоянном потенциале электрический ток обратно пропорционален сопротивлению раствора и может быть измерен с помощью измерителя электрического сопротивления.

Электрическая проводимость является обратной величиной электрического сопротивления, как показано в таблице 9.1. Измеренная электрическая проводимость является чистым результатом концентрации соли в растворе и геометрии электрода. Эффекты геометрии электрода воплощены в постоянной ячейке, которая связана с расстоянием между электродами, деленным на их эффективные площади поперечного сечения. Постоянная ячейки обычно измеряется путем калибровки растворами хлорида калия (KCl) известной концентрации. Классификация качества воды на основе электрического сопротивления или проводимости была предложена ASTM (см. рисунок 9.9).

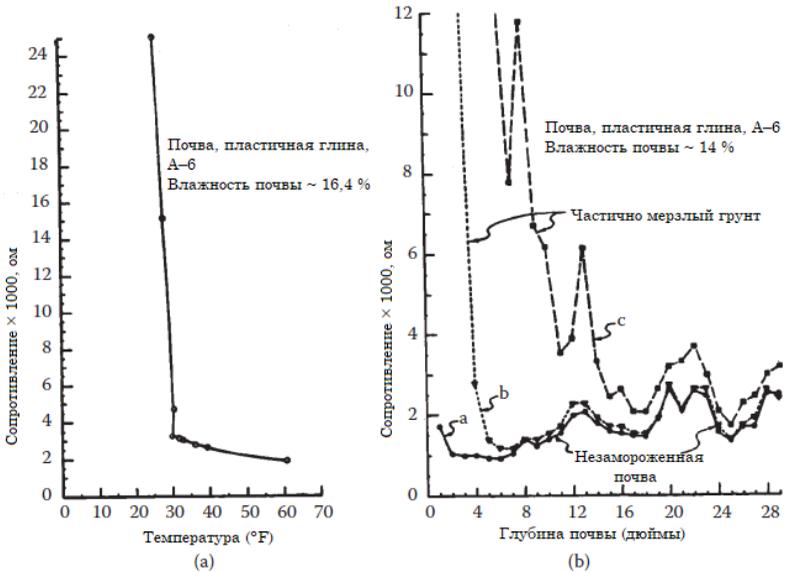


Рисунок 9.8. Определение глубины замерзания путем измерений электрического сопротивления в AASHTO Road Test, Оттава, Иллинойс: (а) температура в зависимости от электрического сопротивления, (б) глубина грунта в зависимости от электрического сопротивления (по Carey, W. N., Jr. and Andersland, O. B. [1957], Highway Res. Abstr., v. 27, p. 4. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в свободном доступе и не подлежит защита авторских прав).

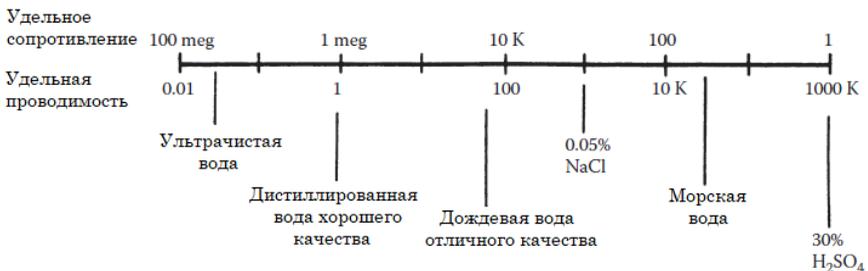


Рисунок 9.9. Удельное сопротивление и проводимость различных типов воды. Единицы: удельное сопротивление – ом-см; удельная проводимость – микро-мо/см ($\mu\text{м}/\text{см} \times 10^2 = \text{с}/\text{м}$).

Таблица 9.3. Диэлектрическая проницаемость и другие физико-химические свойства воды и некоторых органических соединений.

Соединение	Формуля	ϵ	μ	γ	DM
Вода	H ₂ O	80,4	0,894	1,0	1,89
Уксусная кислота	C ₂ H ₄ O ₂	6,1	1,05	1,28	1,74
Ацетон	C ₃ H ₆ O	20,7	0,79	0,33	2,90
Анилин	C ₆ H ₅ NH ₂	6,9	1,02	4,40	1,55
Бензол	C ₆ H ₆	2,28	0,88	0,65	0
Четыреххлористый углерод	CCl ₄	2,24	1,50	0,97	0
Хлорбензол	C ₆ H ₅ Cl	5,71	1,11	0,80	1,69
Циклогексан	C ₆ H ₁₂	2,02	0,78	1,02	
Диметилформанид	(CH ₃) ₂ NCON	26,6	0,802	0,950	3,85
Диметилсульфоксид	(CH ₃) ₂ SO	48,9	1,98	1,1008	3,90
Этанол	C ₂ H ₆ O	24,3	0,79	0,20	1,69
Этиленгликоль	C ₂ H ₆ O ₂	38,66	1,11	21,0	2,28
Гептан	C ₇ H ₁₆	1,0	0,68	0,41	0
Гексан	C ₆ H ₁₄	1,89	0,66	0,33	0,08
Метанол	CH ₄ O	33,62	0,79	0,54	1,66
Нитробензол	C ₆ H ₅ NO ₂	35,74	1,20	2,03	4,22
П-диоксан	C ₄ H ₈ O ₂	2,21	1,44	1,03	0,45
Фенол	C ₆ H ₆ O	13,13	1,06	12,7	1,45
Тетра хлорэтилен	C ₁₂ CCl ₂	2,30	0,72	1,60	0

Примечание: ϵ – диэлектрическая проницаемость (20°C); μ – вязкость, сантипуаз (20°C); γ – удельный вес, г/см³ (20°C); DM – дипольный момент, дебай.

9.6.5. Электрические свойства загрязненной почвы

Инженерные свойства загрязненной почвенно-водной системы тесно связаны с электрическими свойствами той же системы. Как правило, измеряются электрический заряд поверхности и диэлектрическая проницаемость и проводится окислительно-восстановительная реакция. Значения электрического заряда и pH приведены в таблицах 9.2 и 9.3 и на рисунках 9.7 и 9.8. Обратите внимание на эти таблицы и рисунки: pH раствора в системе почва–вода играет значительную роль, поскольку загрязненные поровые флюиды изменяют ионообменные реакции и, следовательно, будут влиять на электрические свойства в системе почва–вода. Для измерения геотехнического поведения загрязненной почвы и воды в окружающей среде окислительно-восстановительная реакция служит эффективным методом измерения, который обсуждается в разделах 5.8 и 9.4. Некоторые результаты испытаний представлены на рисунке 9.3.

9.7. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ КОНСТАНТА ПОЧВЕННО-ВОДНОЙ СИСТЕМЫ

9.7.1. Характеристики диэлектрической проницаемости

Концепция диэлектрической проницаемости, предложенная Quinke в 1859 году как мера способности материала выступать в качестве изолятора, обсуждается в разделе 5.3. Поскольку эта константа является полезным

измеримым параметром для оценки загрязненной системы почва–вода, необходимо на ней остановиться подробнее. Основные характеристики, методы измерения, типичные данные и корреляция с другими параметрами почвы будут представлены в этом разделе.

В системе почва–вода молекула воды обладает электрическим дипольным моментом. Из-за этого молекулы воды имеют тенденцию ориентироваться в сильном электрическом поле таким образом, что положительные полюсы будут обращены к отрицательному электроду, а отрицательные полюсы – к положительному электроду. Кроме того, облако отрицательных электронов вокруг ядра кислорода деформируется или поляризуется в электрическом поле. Таким образом, образуется индуцированный диполь, который добавляет свой момент к моменту постоянного диполя. Случайное кинетическое движение молекул воды имеет тенденцию противодействовать выравняющему воздействию электрического поля на постоянные диполи, в то время как оно практически не влияет на индуцированные диполи.

Выравнивание диполей в электрическом поле, происходящее на фоне эффекта разупорядочения кинетической энергии молекул, уменьшает эффективную напряженность поля в зависимости от силы диполей и их концентрации на единицу объема и противодействия кинетической энергии. Мера объемного эффекта – диэлектрическая проницаемость вещества.

9.7.2. Диэлектрическая проницаемость вещества

9.7.2.1. Общее обсуждение

Чтобы проиллюстрировать диэлектрическую проницаемость (ϵ) вещества, можно использовать уравнение 9.6. Если вещество помещается между двумя точечными зарядами, c_1 и c_2 , расположенными на расстоянии (r) друг от друга, оно уменьшает силу между этими зарядами, как описано в формуле:

$$c_1 c_2 / r^2 \text{ to } c_1 c_2 / r^2 (\epsilon) \quad (9.6)$$

Для определенных взаимодействий почвы и воды использование диэлектрической проницаемости приводит к более легкому описанию и пониманию. Диэлектрическая проницаемость имеет широкие диапазоны, от 1,0 для гептана до 80 для воды. Таблица 9.3 суммирует диэлектрическую проницаемость и другие физико-химические свойства воды и некоторых органических соединений.

9.7.2.2. Измерение диэлектрической проницаемости

Диэлектрическая проницаемость не измеряется напрямую. Он вычисляется из следующего уравнения:

$$\epsilon = C_s d/A \quad (9.7)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость; C_s – емкость, Ф (раздел 9.8); d – длина образца (= 0,7 см); A – площадь поперечного сечения образца (= 2,85 см²) и = 8,85 × 10⁻¹⁴ Ф/см.

Для типичного образца почвы, где известны d и A (Tuncan, 1992):

$$\epsilon = 2.775C_s$$

9.7.2.3. Измерение электрической дисперсии

Электрическая дисперсия – это модификация диэлектрической проницаемости, которую предложили Arulanandan и Smith (1973). Методика основана на изменении частоты переменного тока кажущейся диэлектрической проницаемости и электрической проводимости (мо/см) насыщенных глин в диапазоне радиочастот (106–08 Гц). Это явление называется диэлектрической дисперсией. Типичная дисперсионная кривая для насыщенной иллитовой глины показана на рисунке 9.10. При увеличении частоты наблюдается уменьшение диэлектрической проницаемости и увеличение проводимости. Было доказано, что основными факторами, влияющими на диэлектрическую дисперсию мелкозернистых почв на радиочастоте, являются композиционные свойства различных фаз и гетерогенная природа системы (Smith и Arulanandan, 1981).

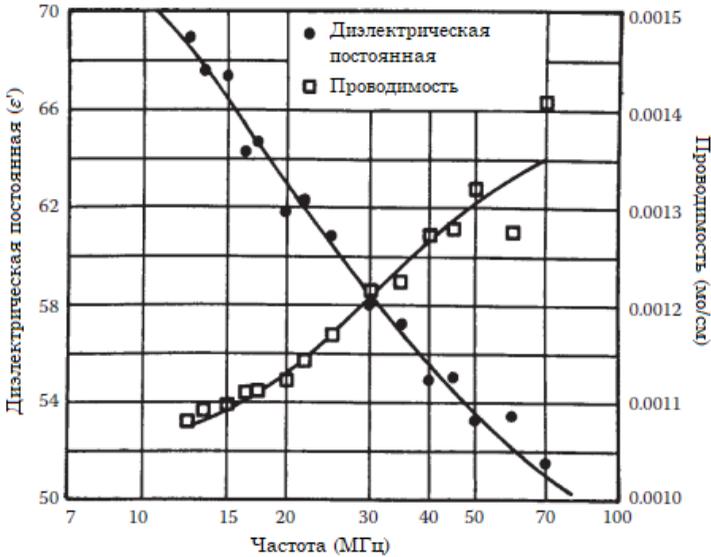


Рисунок 9.10. Кривые диэлектрической проницаемости и дисперсии электропроводности иллитовой глины (по Smith, S. S. and Arulanandan, K. [1981], J. Geotech. Eng., Proc. ASCE, v. 107, n. GT5, pp. 591–604. With permission from ASCE).

9.7.3. Диэлектрическая проницаемость воды и других поровых жидкостей

9.7.3.1. Диэлектрическая постоянная воды

На основании экспериментальных данных, полученных от Eisenberg и Kanzmann (1969), на которые ссылается Winterkorn (1974), ход статической диэлектрической проницаемости воды между 0 и 100 °С выражен следующим уравнением:

$$\epsilon = 87.740 - 0.40008(t) + 9.398 \times 10^{-4}(t^2) - 1410 \times 10^{-6}(t^3) \quad (9.9)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость, а t – температура, °С.

Рисунок 9.11 показывает зависимость для воды диэлектрической проницаемости от температуры. Диэлектрическая проницаемость воды составляет около 80 и является самой высокой среди обычных жидкостей, как указано в таблице 9.3. Высокая диэлектрическая проницаемость воды является причиной ее большой растворяющей способности для сильных электролитов. Таким образом, силы электрического притяжения, существующие между двумя ионами в вакууме, уменьшаются до примерно 1/80 для тех же расстояний в случае введенной воды. Это уменьшение является достаточным, чтобы превалировать тенденцию дисперсии кинетической молекулярной энергии.

9.7.3.2. Диэлектрическая постоянная в зависимости от значения pH

Как обсуждалось в разделе 5.4 и показано на рисунке 5.6, pH измеряет только концентрацию иона Н в растворе. Однако диэлектрическая проницаемость измеряет и типы ионов, и их концентрации в растворе. Поэтому для загрязненной системы почва–вода диэлектрическая проницаемость является более эффективным показателем по сравнению с измерениями pH. На основании ограниченных данных, полученных в результате лабораторных испытаний, проведенных в Университете Лихай, указывается, что (а) когда значение pH находится в диапазоне от 6 до 9, то ион Н доминирует в растворе, следовательно, показатель pH является эффективным; однако (b) когда раствор содержит многоионы, измерение по диэлектрической проницаемости является более эффективным. Для лучшего понимания механизмов этих двух испытаний необходимы дальнейшие исследования этих двух параметров в различных условиях окружающей среды.

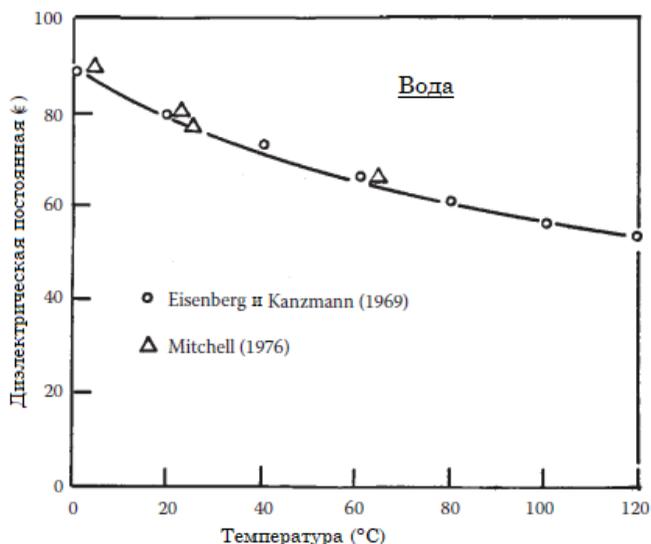


Рисунок 9.11. Диэлектрическая проницаемость воды в зависимости от температуры

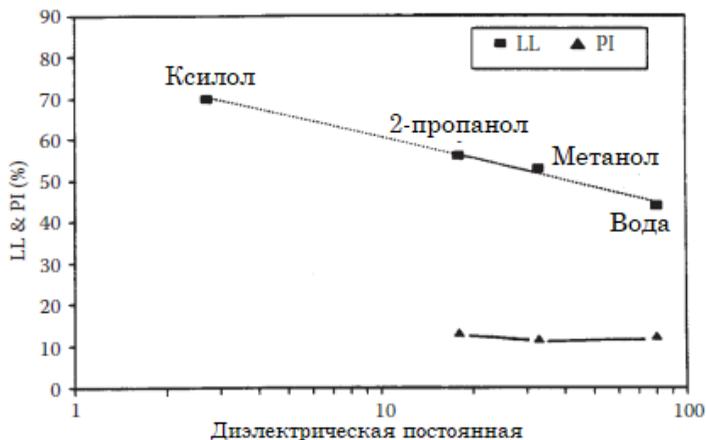


Рисунок 9.12. Аттерберговский предел растворителей как функция диэлектрической проницаемости (по Kaуa, A. and Fang, H. Y. [1996], ASTM STP 1282, pp. 303–314).

9.7.4. Влияние диэлектрической проницаемости на поведение почвы

9.7.4.1. Почвенные константы

Влияние диэлектрической проницаемости на поведение почвы является значительным, поскольку на диэлектрическую проницаемость влияют как концентрация ионов, так и типы ионов в почвенно-водных системах. Asaг и Olivieri (1989) показывают влияние органических жидкостей, отражаемое диэлектрической проницаемостью, на границы Аттерберга каолинитовых глин из Джорджии. Это влияние состоит в том, что диэлектрическая проницаемость растворителя уменьшается, верхний предел пластичности (LL) почвы увеличивается, а индекс пластичности (PI) остается постоянным. Во время смешивания каолинита с растворителями было отмечено, что почва агрегирует, образуя небольшие домены.

Kaуa и Fang (1996), используя предел растворителей Аттерберга как функцию диэлектрической проницаемости, как показано на рисунке 9.12, обнаружили, что эти наблюдения полностью совместимы с наблюдением Mesгі и Olson (1971) и Fernandez и Quigley (1985) в что диэлектрическая проницаемость влияет на флокуляцию и канализацию в структуре почвы. Уменьшение диэлектрической проницаемости вызывает агрегацию и канализацию в пределах массы почвы, что приводит к увеличению площади потока.

9.7.4.2. Диэлектрическая постоянная, связанная с СЕС и дзета-потенциалом

Катионообменная емкость (СЕС) каолиновой почвы определяется извлечением натрия. Для полного растворения ацетата натрия в растворителях все растворители готовили с 25 % воды (75 % растворителя и 25 % воды). Результат СЕС каолинита представлен на рисунке 9.13а. Из рисунка 9.13а очевидно, что СЕС линейно увеличивается с увеличением диэлектрической проницаемости поровой жидкости.

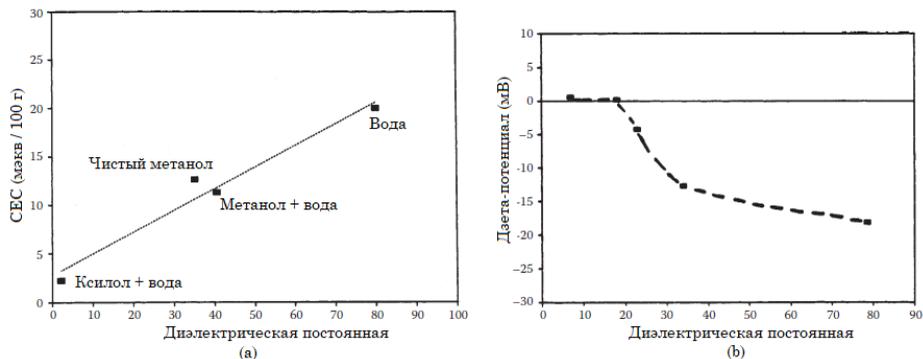


Рисунок 9.13. Связь диэлектрической проницаемости с катионообменной емкостью и дзета-потенциалом: (а) катионообменная емкость и (б) дзета-потенциал (по Кауа, А. and Fang, Н. У. [1996], ASTM STP 1282, pp. 303–314).

Дзета-потенциал (ζ) почвы является важным параметром в области электрической энергии. Подробное обсуждение этого аспекта будет представлено в разделе 9.9.4. Однако в этом разделе обсуждается связь между диэлектрической проницаемостью и дзета-потенциалом. Дзета-потенциал в зависимости от диэлектрической проницаемости представлен на рисунке 9.13b. Изучая рисунок 9.13b, можно увидеть, что диэлектрическая проницаемость поровой жидкости уменьшается и достигает нулевого значения в пределах диапазона экспериментальной ошибки, что можно объяснить тем фактом, что плотность поверхностного заряда частиц грунта уменьшается с ростом плотности поверхностного заряда протона все меньше и меньше.

9.7.4.3. Влияние диэлектрической проницаемости на проводимость и сжимаемость

Для мелкозернистой почвы нет определенной взаимосвязи между гидравлической проводимостью и отношением пустот (рисунок 7.6), что особенно верно для загрязненных почв. Используя те же данные из рисунка 7.4, было обнаружено, что существует хорошая взаимосвязь между гидравлической проводимостью и диэлектрической проницаемостью, как показано на рисунке 9.14. Обсуждения идентификации загрязненной почвы по диэлектрической проницаемости и проводимости даны в работе Кауа и Fang (1977). На основании данных Waidelich (1958) также могут быть получены диэлектрическая проницаемость в зависимости от индекса сжатия (c_c) и индекса набухания (c_s) трех глинистых минералов с семью типами поровых флюидов.

9.7.4.4. Влияние диэлектрической проницаемости на набухание

Vasu (1972) представляет взаимосвязь между разбуханием и диэлектрической проницаемостью кластера влажных почв, указывая на то, что для этих различных типов почв была получена хорошая корреляция между повышением диэлектрической проницаемости кластеров влажных почв и процентом набухания. Сделан вывод, что диэлектрическая проницаемость является мерой водопоглощения почвы и может использоваться для оценки потенциала разбухания в почвах.

Brown и Thomas (1987) сообщают о набухании каолинита, иллита и смектита. Они обнаружили, что существует значительная связь между диэлектрической

проницаемостью растворителя и набуханием. Увеличение набухания с уменьшением диэлектрической проницаемости объясняется увеличением флокуляции глинистых частиц с уменьшением диэлектрической проницаемости. Asar и Olivieri (1989) сообщили о влиянии органических жидкостей на свободное набухание монтмориллонитовой глины, отраженное на диэлектрической проницаемости (рисунок 9.15). Кроме того, были обнаружены значительные связи между различными органическими жидкостями.

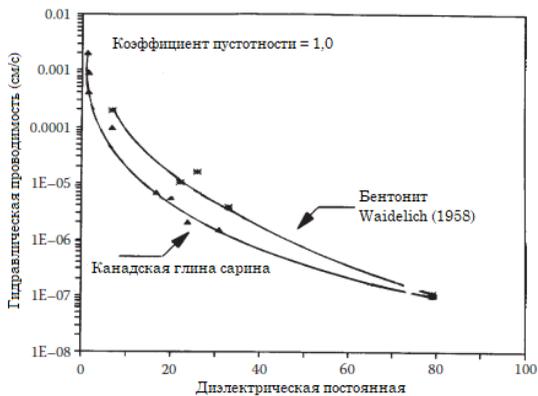


Рисунок 9.14. Диэлектрическая проницаемость и гидравлическая проводимость (по Fernandez, F. and Quigley, R. B. [1985], *Can. Geotech. J.*, v. 22, pp. 205–214; Kaya, A. and Fang, H. Y. [1996], *ASTM STP 1282*, pp. 303–314).

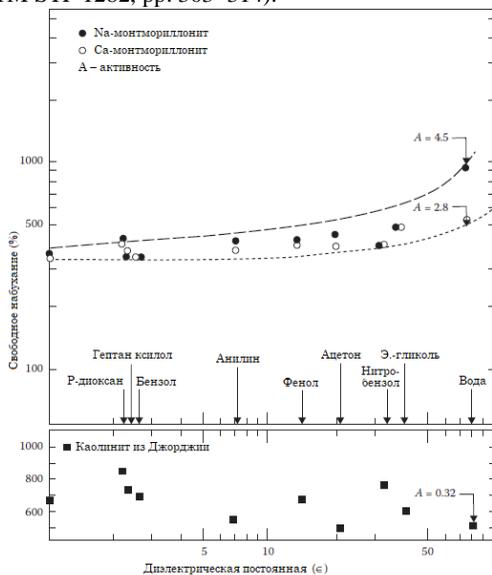


Рисунок 9.15. Влияние органических жидкостей на свободное набухание монтмориллонитовой глины, отраженное на диэлектрической проницаемости (по Asar, Y. B. and Olivieri, I. [1989], *HRB Annual Meeting*, 24 p. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не подлежит защите авторских прав).

9.8 ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ И КТРОКИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

9.8.1. Общее обсуждение

Поток жидкости через систему грунт–вода, вызванный электрическим потенциалом, называется электропроводностью. Поведение такого движения жидкости под действием электрического потенциала называется электрокинетическими явлениями. Явления можно разделить на две основные группы, как показано в таблице 9.4.

1. *Явления между частицами почвы.* В потоке жидкости через частицы почвы движется только вода. Частицы почвы остаются на прежнем уровне. Это явление называется *электроосмосом*, оно показано на рисунке 9.16а.

2. *Явления в глинистой суспензии.* Частицы почвы движутся в суспензии между другими частицами, как показано на рисунке 9.16 (b и c). Изображенное на рисунке 9.16с называется *электрофорезом*, он будет более подробно обсуждаться в разделе 9.12.

Таблица 9.4. Классификация электрокинетических явлений, связанных с частицами почвы в глинисто-водной мицелле

Электрокинетические явления между частицами почвы

Электроосмос – движение потока между частицами почвы за счет электрического потенциала; движется только поток (например, вода), а почвенная (твердая) частица не движется (см. рисунок 9.16а).

Электрокинетические явления в глинистой суспензии

Физическое (или механическое) поведение частицы

Движение частиц в глинистой суспензии под действием внешней силы (ЭДС) действует на частицу, на ее физическое или механическое поведение (см. рисунок 9.16b). Есть три возможных явления.

Потоковый потенциал – из-за гидравлического градиента или из-за разности потенциалов (Δp).

Потенциал седиментации – из-за гравитационного оседания.

Потенциал поднятия – благодаря действию капиллярности.

Физико-химическое поведение частицы

Электрофорез – заряженные частицы в глинистой суспензии притягиваются друг к другу или отталкиваются друг от друга; отрицательно заряженные частицы движутся к аноду (см. рисунок 9.16с).

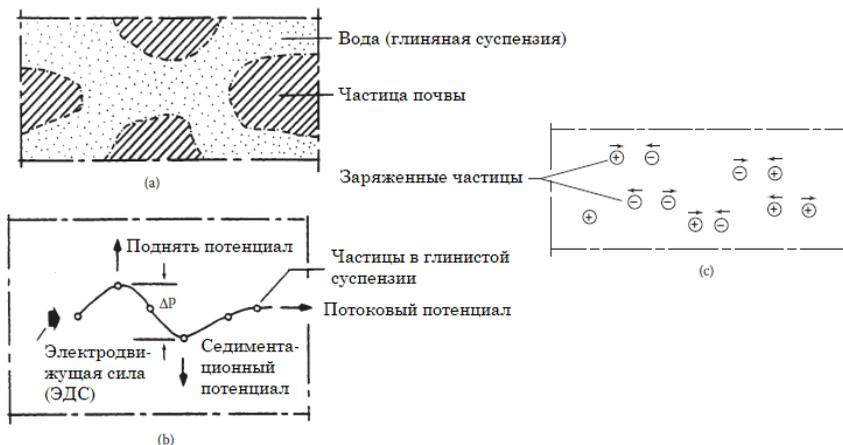


Рисунок 9.16. Электрокинетические явления в глинисто-водной мицелле: (а) электрокинетические явления между частицами почвы (электроосмос); (б) физическое (механическое) поведение частиц почвы; (с) физико-химическое поведение частиц почвы (электрофорез).

Движение воды через капилляры и поры в результате применения электрических потенциалов впервые в 1808 году описал Reuss. Он обнаружил, что постоянный электрический ток может перемещать воду через пористую глину и стеклянные диафрагмы к отрицательному полюсу. Классическая теория, объясняющая это явление, принадлежит Гельмгольцу (1879), она была упрощена Смолуховским в 1903 году. Первоначально теория была основана на простом условии течения в стеклянном капилляре, а затем развивалась способом, аналогичным приведению уравнения Пуазейля к уравнению типа Дарси вместе с предположениями, обсуждаемыми в следующем разделе.

9.8.2. Выдвижение и совершенствование теории Гельмгольца–Смолуховского

1. Жидкость несет заряд, противоположный заряду жесткой стенки, и две системы заряда образуют электрический двойной слой (раздел 4.9) вдоль стенки.
2. Толщина двойного электрического слоя (рисунок 4.15) очень мала, но не бесконечно мала.
3. Слой молекул жидкости, контактирующий со стенкой, неподвижен, а остальные молекулы в жидкости внутри двойного электрического слоя подвижны.
4. В двойном электрическом слое возникает ламинарный поток, скорость которого возрастает от нуля рядом со сплошной стенкой до максимума в центре слоя противодействия в жидкости. Следовательно, скорость остается постоянной для оставшейся части поперечного сечения.
5. Внешне приложенный электрический потенциал действует на заряды двойного слоя.

6. Стенка является изолятором, а содержащаяся жидкость обладает электрической проводимостью.

Анализ обоснованности теории двойного электрического слоя Гельмгольца–Смолуховского проводили Gouy (1910), Stern (1924), Bolt (1955) и Grey и Mitchell (1967). Основное уравнение представлено в следующем виде:

$$\zeta = \frac{4\pi\sigma d}{\epsilon} \quad (9.10)$$

где ζ – дзета-потенциал; σ – плотность поверхностного заряда; d – расстояние перемещения; ϵ – диэлектрическая проницаемость.

Следует отметить, что уравнение 9.10 утверждает, что дзета-потенциал (ζ) пропорционален плотности поверхностного заряда (σ) частицы.

9.8.3. Обсуждение теории Гельмгольца–Смолуховского

9.8.3.1. Ограничения теории Гельмгольца–Смолуховского

1. Теория Гельмгольца–Смолуховского основана на двухслойной толщине коллоида. Она хорошо применяется для пор, которые не слишком малы, и для стен, у которых двойной электрический слой не слишком рассеян (Winterkorn, 1963).

2. Теория может быть применена только к узкому кругу типов почв, таких как ненарушенная или переработанная илистая глина (Tschebotarioff, 1951; Casagrande, 1952).

3. Теория не может быть применена к глинистым грунтам с нарушенными условиями, обычно используемым для вкладышей в системах контроля опасных и токсичных отходов.

4. Она также не может быть использована для тяжелых органических почв или веществ животного и растительного происхождения, таких как разнообразные материалы, найденные в местах захоронения отходов (Fang, 1995b).

9.8.3.2. Модификации и теория Гуи–Чепмена

В дальнейшем развитии теории Гельмгольца–Смолуховского участвовали многие исследователи. Основные модификации касаются взаимосвязи между электрическим потенциалом (ψ) и расстоянием от поверхности частицы (рисунок 4.12). Эти модификации трех исследователей приведены на рисунке 9.17.

Существует множество теоретических уравнений, основанных на предположениях, отраженных на рисунке 9.17, для описания поведения глины в системе глина–вода; теория Гуи–Чепмена (1910, 1913) наиболее часто используется в геотехнической инженерии. Модель Гуи–Чепмена говорит нам, что тенденция к флокуляции или агрегации обычно усиливается за счет уменьшения толщины двойного слоя, соответствующего уменьшению силы отталкивания между частицами. И наоборот, тенденция к дисперсии увеличивается с увеличением толщины двойного слоя. Следовательно, если толщина двойного слоя увеличивается, электрическое отталкивание между

частицами увеличивается, что заставляет частицы рассеиваться. Поэтому тенденция к дисперсии обусловлена увеличением толщины двойного слоя.

Теория распределения ионов Гоуи–Чепмена была включена в механику почвы из коллоидной химии, чтобы помочь объяснить и понять поведение систем глина–вода. Как обсуждалось в разделе 4.9 и отражено на рисунке 4.12, глинистый минерал имеет чистый отрицательный заряд на коллоидной поверхности. Этот суммарный отрицательный заряд вызывает притяжение положительных ионов или катионов в растворе. Дополнительная информация о толщине двойного слоя будет дана в следующем разделе.

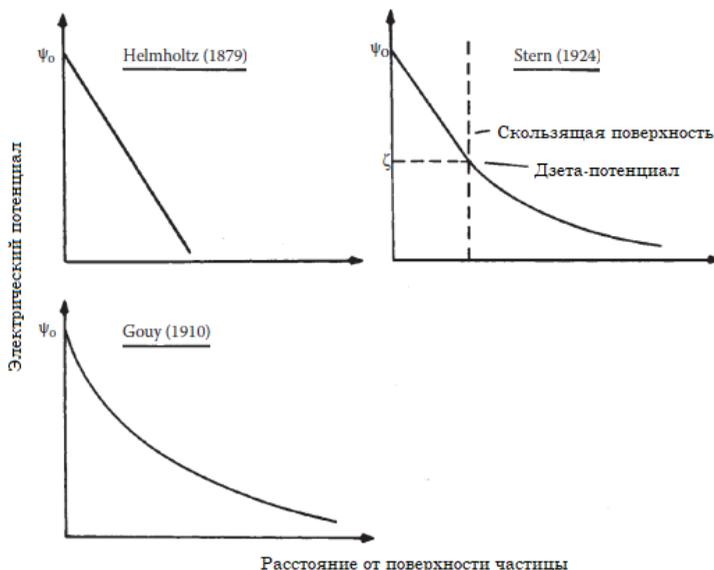


Рисунок 9.17. Сравнение характеристик электрических двухслойных и дзета-потенциальных моделей.

9.8.4. Электрическая двухслойная толщина и дзета-потенциалы

9.8.4.1. Электрическая двухслойная толщина

Выдающееся исследование было проведено Quinke в период с 1859 по 1861 год. Его значительный вклад в изучение электрических свойств почвы включает изучение потенциала течения, концепции электрического двойного слоя и диэлектрической проницаемости. Концепция электрического двойного слоя будет рассматриваться далее. Две же другие темы обсуждаются в отдельных разделах.

Основываясь на лабораторных экспериментах, Quinke предложил концепцию двойного электрического слоя. В системе, содержащей твердое вещество в жидкости (суспензия), на границе раздела находятся два электрических слоя противоположных знаков, один из которых образует слой, прилипший к твердому веществу, а другой содержится в жидкости. Для идеализированной частицы почвы и связанных с ней ионов, если применяется внешняя разница в потенциале,

можно наблюдать, что почва и тонкий слой привлеченных катионов, находясь в диффузной системе противоионов и связанной с ней воды, будут двигаться в направлении катода. Эта система называется диффузным двойным слоем. Проще говоря, двойной слой состоит из глинистых частиц, адсорбированных катионов и молекул воды в одном слое, в то время как другой слой представляет собой диффузный рой противоионов. Теория, объясняющая эту систему, называется теорией диффузного двойного слоя. Теория двойного слоя пренебрегает эффектами потенциальной энергии в ориентированных молекулах воды, которые окружают частицы глины, на что указал Low (1951). Однако эта теория полезна для объяснения некоторых основных явлений в системе глина–вода–электролит. Уравнение для толщины двойного слоя, основанное на теории Гуи–Чепмена, имеет следующий вид (van Olphen, 1977):

$$t = \sqrt{\frac{\epsilon K T}{8 \pi n e^2 v^2}} \quad (9.11)$$

где t – толщина двойного слоя; ϵ – диэлектрическая проницаемость; K – постоянная Больцмана; T – температура; n – концентрация электролита; e – элементарный заряд; v – ионная валентность.

Из уравнения 9.11 Lambe (1958) вывел список переменных в системе почва–вода, которые влияют на коллоидную стабильность. Это (1) концентрация электролита, (2) ионная валентность, (3) диэлектрическая проницаемость, (4) температура, (5) размер гидратированного иона, (6) pH и (7) адсорбция анионов. На основании толщины двойного слоя и ее влияния на структуру глинистых минералов в комбинации определяются различные ассоциации частиц. Ученый пишет, что флокулированные или агрегированные структуры – это те структуры, в которых частицы имеют тенденцию собираться вместе. Дисперсные или дефлокулированные структуры представляют собой структуры, в которых частицы глины имеют тенденцию раздвигаться.

На основе модели Гуи–Чепмена (уравнение 9.11) влияние свойств поровой жидкости на толщину двойного слоя обсуждалось в разделе 4.9 и отражено в таблице 4.3. Однако некоторая дополнительная информация о поровых жидкостях, относящихся к толщине двойного слоя, дана на рисунках 9.18 и 9.19. На рисунке 9.18 приводятся две поровые жидкости, и в обоих случаях концентрация поровых жидкостей увеличивается с уменьшением толщины двойного слоя. На рисунке 9.19 показан электрический потенциал (ψ) в зависимости от толщины двойного слоя с тремя жидкостями с порами, отраженный от диэлектрической проницаемости (ϵ). Более подробное определение этих структур и определение, относящееся к загрязненной почвенно-водной системе, составил Evans (1991), развив тем самым описание, которое дал Van Olphen (1977).

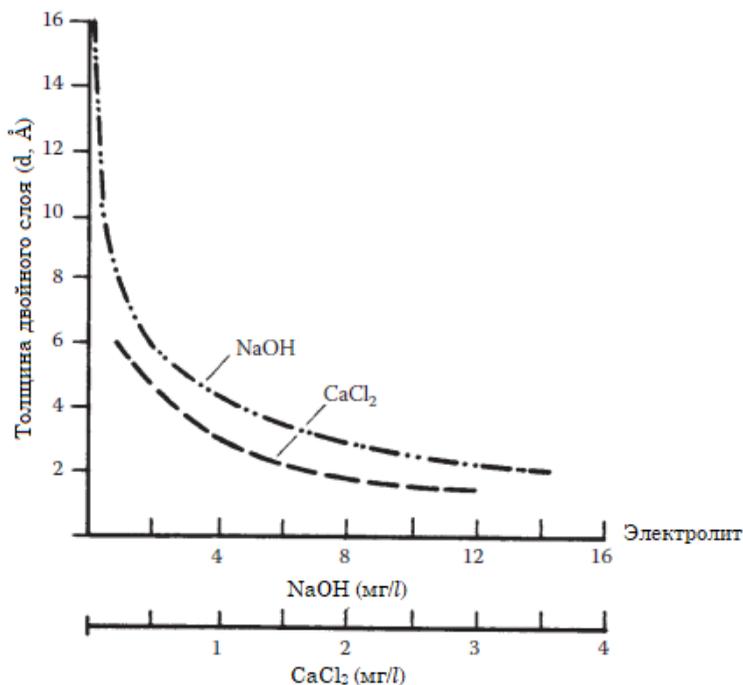


Рисунок 9.18. Связь между толщиной двойного слоя и типами и концентрацией поровой жидкости (электролита). (По Marshall, С. Е. [1949], *The Colloidal Chemistry of the Silicate Minerals*, Academic Press, New York.)

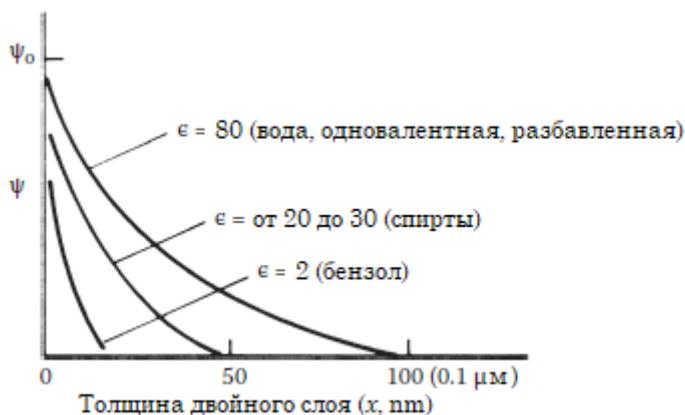


Рисунок 9.19. Влияние поровой жидкости на толщину двойного слоя, отраженное диэлектрической проницаемостью (по Fernandez, F. and Quigley, R. B. [1985], *Can. Geotech. J.*, v. 22, pp. 205–214).

9.8.4.2 Дзета-потенциал(ζ)

Дзета-потенциал (ζ) – это электрический потенциал, возникающий на границе раздела твердое тело – жидкость в ответ на движение коллоидных частиц, как показано на рисунке 4.12. Под воздействием приложенного потенциала частица и неподвижная пленка, содержащая ионы между поверхностью частицы и граничной линией (пунктирная линия), движутся к отрицательному электроду. Толщина двойного слоя влияет на величину потенциала. Когда концентрация электролита увеличивается, потенциал уменьшается. В общем, было показано, что стабильность коллоидных частиц является функцией потенциала. В разделе 9.9.2 различные модельные исследования были использованы для иллюстрации аналитических решений дзета-потенциала. Факторы, влияющие на дзета-потенциал, включают в себя типы ионов, температуру, адсорбцию, размер частиц и форму частиц.

Аналитическое решение для дзета-потенциала может быть вычислено из уравнения 9.10. Это также может быть измерено экспериментальными методами. Подробное обсуждение измерений дзета-потенциала можно получить из стандартного физико-химического учебника. На дзета-потенциалы влияют многочисленные факторы. Некоторые относительно важные факторы представлены на рисунках с 9.20 по 9.22. На рисунке 9.20 показано влияние процента ионного обмена и радиуса иона на дзета-потенциал. На рисунке 9.21 показано, что при рН между 9 и 10 дзета-потенциал четырех основных глинистых минералов (то есть монтмориллонита, иллита, каолинита и галлуазита) является максимальным. Влияние рН на одну почву в различных условиях окружающей среды показано на рисунке 9.22.

9.9. УЛУЧШЕНИЕ ПОЧВЫ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

9.9.1. Характеристики и механизмы

Связь между гидравлическим и электрическим индуцированным потоком через мелкозернистый материал, где есть заряженные частицы (то есть ионы), уравновешенные катионами, известна как электрокинетическое явление. Электрокинетическое явление может включать четыре процесса: электроосмос, потоковый потенциал, электрофорез и миграцию, или седиментацию (Mitchell, 1993). Ограничения использования электрокинетического явления для обезвоживания (дренажа) рассматривал Tscheborarioff (1951). Это указывает на то, что данное явление можно эффективно использовать только в узком диапазоне размеров частиц почвы, как показано в области [2] на рисунке 9.23. Также на рисунке 9.23 в области [1] поток управляется силовыми полями разных сред, а не только электрической энергией. В области [3] механическая энергия (Закон Дарси) доминирует в движении потока. Другими словами, дополнительная электрическая энергия не требуется. Как показано на рисунке, для электрокинетического процесса подходят только ил или илстые глины.

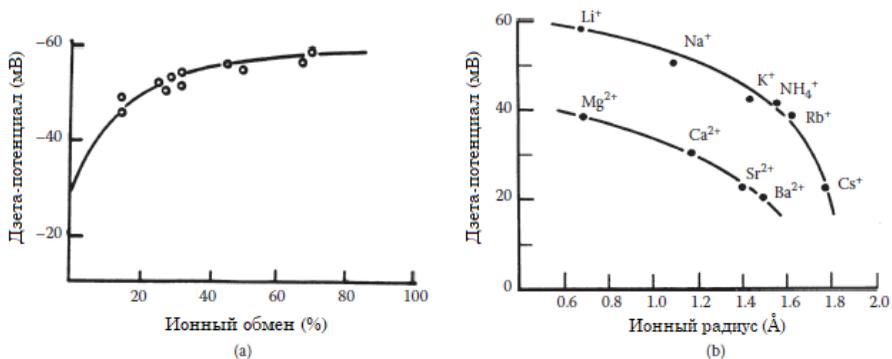


Рисунок 9.20. Дзета-потенциал в зависимости от характеристик ионов: (а) ионообменная емкость, (б) ионный радиус (по Jenny, H. and Overstreet, R. [1935], J. Phys. Chem., v. 43, pp. 1185–1196; Joffe, J. S. [1949], Pedology, 2nd ed., Rutgers University Press, New Jersey).

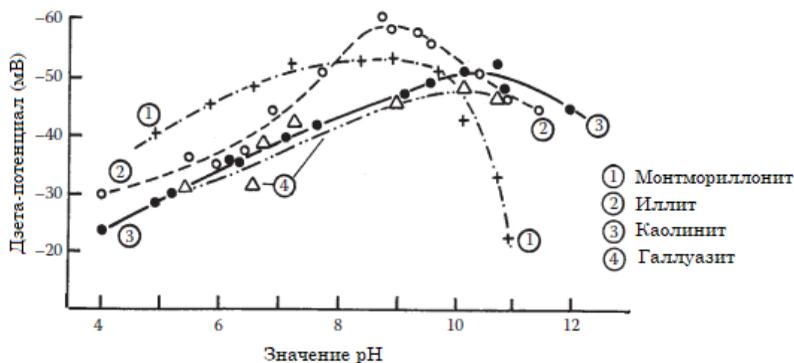


Рисунок 9.21. Влияние значения pH на дзета-потенциал четырех основных глинистых минералов (по Bergna, H. E. [1950], Trans. 4th Int. Congress of Soil Society, v. 3, pp. 75–80).

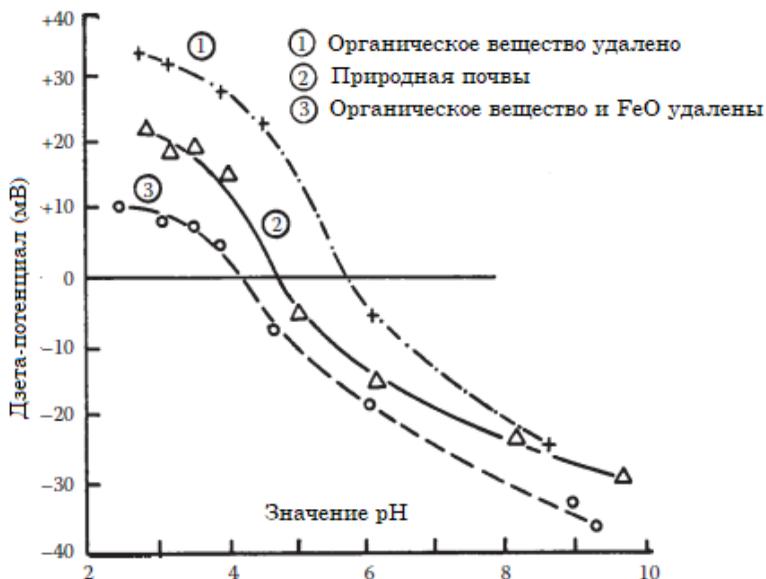


Рисунок 9.22. Влияние значения pH на зета-потенциал латеритной почвы при различных условиях окружающей среды (по Chiang and Shen [1962]; cited by Yu, T. Y. and Chiang, H. Y. [1984], *Electro-Chemical Properties of Soils*, Scientific Publ. Co., Beijing. [На китайском]).



Рисунок 9.23. Допущения классической теории ограничены для почвы в узком диапазоне частиц почвы.

9.9.2. Обезвоживание и стабилизация почвы

Механизмы электрокинетического процесса, используемого для обезвоживания и дезактивации, отличаются, как показано на рисунке 9.24. Рисунок 9.24а представляет собой схематическую иллюстрацию процесса обезвоживания. Когда жидкость (вода) удаляется из почвы электрическим током, то пустоты между частицами почвы уменьшаются. Следовательно, плотность почвы увеличивается. Механизм дезактивации почвы, который будет обсуждаться в разделе 9.11, схематически показан на рисунке 9.24b. Электрохимический процесс стабилизации почвы будет обсуждаться в разделе 9.12.



Рисунок 9.24. Механизмы обезвоживания и дезактивации электрокинетическим процессом: (a) процесс обезвоживания (дренаж), (b) процесс дезактивации почвы.

9.9.3. Факторы, влияющие на электрокинетический процесс

Как показано на рисунке 9.23, электрокинетический процесс ограничен в узких диапазонах частиц и типов почвы. В дополнение к размеру частиц почвы, существуют другие факторы, которые влияют на электрокинетический процесс; это электродные материалы, ионообменная емкость, концентрация ионов и т. д. (Lockhart, 1983). Кроме того, скорость электрического потока, напряжение, направление потока и типы поровой жидкости также влияют на электрокинетический процесс (Khan и соавторы, 1989).

В дополнение к обезвоживанию с помощью электрокинетического процесса, другие области применения включают стабилизацию почвы из неустойчивых насыщенных иловых, лессовых, плавунных глинистых и соляно-щелочных почв.

Электрокинетический процесс часто связан с электрохимическим методом, который будет обсуждаться в разделе 9.13. Кроме того, этот процесс был применен к различным системам фундаментов, таким как свайное основание, усиленная земля и грунтовые анкеры, в целях увеличения плотности или уменьшения содержания влаги вокруг конструкции фундамента. Современный обзор стабилизации и обезвоживания почв дал Casagrande (1983). Некоторую дополнительную информацию о применениях электрокинетической обработки в инженерной геотехнике окружающей среды дали Van Zyl и Shackelford (1988).

9.10. ДЕКОНТАМИРОВАНИЕ ПОЧВЫ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

9.10.1. Общее обсуждение

Методы очистки от опасных или токсичных отходов изменились с 1980 года, когда был принят Закон о комплексном реагировании на окружающую среду, компенсации и ответственности (CERCLA) или Закон «О суперфонде». Раннее корректирующее действие для загрязненной почвы состояло в основном из выемки и удаления загрязненной почвы с площадки и захоронения на свалке. Сейчас больше внимания уделяется обработке почвы на месте. В настоящее время обычно используется процесс электрокинетической дезактивации.

Quinke в 1859 году, вероятно, был первым, кто изучил процесс дезактивации с помощью электрокинетического процесса. В его эксперименте использовались четыре типа поровых жидкостей, включая воду, кислоту, соль и скипидар. Он обнаружил, что вода всегда была направлена на катод (-). Однако также было обнаружено, что поток скипидарного масла направлен к аноду (+). От этих простых наблюдений он пришел к выводу, что частицы почвы были электрически заряженными и имели отрицательные заряды в случае воды и положительные заряды в случае скипидарного масла.

9.10.2. Механизм обеззараживания почвы

Механизм электрокинетического процесса при обезвоживании по сравнению с удалением примесей показан на рисунке 9.24а. Чтобы удалить нежелательную загрязненную воду или загрязняющие вещества, попавшие между частицами почвы, пространства между частицами почвы должны оставаться открытыми. Во многих случаях из-за разбухания, усадки, пузырьков воздуха, бактерий в почве и других взаимодействий между почвой и окружающей средой, как показано на рисунке 9.1, характеристики, отражающие состояние между частицами почвы, непредсказуемы. Перезаполнение системы незагрязненной водой, как показано на рисунке 9.24b, должно происходить в процессе электрокинетической очистки почвы.

На дезактивацию почвы электрокинетическим процессом влияют многочисленные факторы. Одним из основных факторов являются электрохимические свойства почвы, как показано на рисунке 9.1. В таблице 9.5 показаны значительные различия между фильтратом и стоками. Основная причина связана с химией электроосмоса и качеством воды, как пишут Segall и соавторы (1980). Поведение некоторых из этих почвенно-электрохимических взаимодействий четко не изучено. Во многих случаях электрокинетический

процесс является эффективным методом дезактивации почвы, а в других – нет. (Дальнейшие обсуждения представлены в работах Segall и Bruell [1992] и Yeung и Datla [1995].)

Таблица 9.5. Сравнение качества воды до и после электрокинетического процесса

Характеристики	До выщелачивания	После очищения
Всего растворенных твердых веществ	29 000	40 500
pH	7,8	13,4
Тяжелые металлы		
Ртуть	<0,001	0,500
Кадмий	<0,100	<0,200
Никель	<0,500	<0,500
Хром	<0,050	0,100
Медь	<0,100	0,760
Цинк	0,220	6,2
Свинец	0,250	2,2
Мышьяк	0,030	4,5
Общая жесткость, как CaCO ₃	4270	590
Кальций	318	120
Магний	1,690	140
Марганец	3,0	0,11
Железо	0,2	20
Натрий	6150	16300
Калий	350	510
Щелочность, как CaCO ₃	960	33780
Гидроксид	0	5950
Карбонат	0	9790
Бикарбонат	1171	0
Хлориды	13670	1120
Сульфаты	640	820
Сульфиды	<0,05	<0,05
Общий фосфор	0,23	20
Нитраты, как N	2,5	<0,1
Нитриты, как N	<0,1	<0,1
Органический азот, как N	4	15
Аммиачный азот, как N	67	128
Общий органический углерод	30	2000
Окислительно-восстановительный потенциал, в мВ	58	-395

Примечание. Потери летучести при прокаливании материала (600°C) при чистке составляют 8,75 %.

Источник: данные из: Segall, B. A. et al. (1980), J. Geotech. Eng. Div. Proc. ASCE, v. 106, n. GT10, pp. 1143–1147.

9.11. ЭЛЕКТРОФОРЕЗ И ЭЛЕКТРОМИГРАЦИЯ

9.11.1. Общее обсуждение

Электрофорез является частью электрокинетических явлений, которые обсуждаются в разделе 9.2 и иллюстрируются в таблице 9.4 и на рисунке 9.16с. В глицерно-водной мицелле большинство частиц почвы, как правило, электрически заряжены, и они будут мигрировать к электроду противоположного заряда, когда

находятся в электрическом поле. Это явление миграции, показанное на рисунке 9.16с, называется *электрофорезом* или *электромиграцией*. Это значение может быть вычислено из уравнения 9.10 или измерено в лабораторных условиях. Общей единицей для этого является микро/с/см. В последние годы было разработано много технических инструментов для измерения электрофореза, например, капиллярный электрофорез (СЕ), о котором сообщает Hewlett-Packard (1995).

9.11.2. Экспериментальные измерения

Существует множество лабораторных измерительных методов и приборов. Ультрафиолетовое (УФ) и ультрафиолетовое/видимое (УФ/вид.) поглощение в настоящее время является наиболее часто используемым методом обнаружения при капиллярном электрофорезе (СЕ). Используя детектор с диодной матрицей, можно одновременно измерять поглощение на большом количестве длин волн, что дает спектральную информацию. Поскольку наблюдаемый спектр характерен для любого анализа, эту информацию можно использовать для идентификации неизвестных соединений. Многоволновое определение длины и определение пиков – это возможности, которые делают детектор с диодной матрицей хорошим инструментом и идеальным детектором для СЕ.

Влияние различных ионов на почву путнам показано на рисунке 9.25. При рассмотрении рисунка 9.25 становится понятно, что характеристики ионообменной емкости играют важную роль. Millar и Turk (1943) сообщают о влиянии электрофоров на различные радиусы ионов. Характерные данные для различных типов почв и глинистых минералов приведены в таблице 9.6.

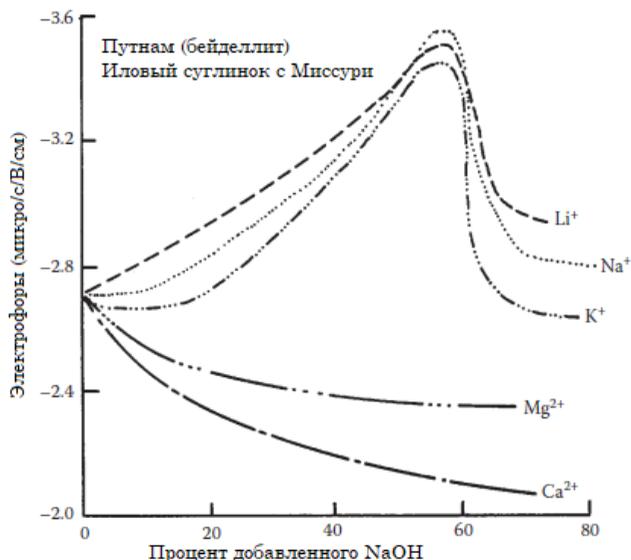


Рисунок 9.25. Влияние NaOH добавлено на электрофорез почвы путнам (по Bayer, L. D. and Hall, N. S. [1937], Missouri Agric. Exp. Stn. Res. Bull. 267).

Таблица 9.6. Электрофорез для различных типов почв и глинистых минералов

Тип иона / тип почвы	Электрофоры (микро/с/В/см)							Ссылки
	H	Li	Na	K	Mg	Ca	Ba	
Шарки	3,20		3,80			1,90		Mattson (1929)
Бентонит	2,75		4,30	3,80				Mattson (1929)
Сесил		2,40	2,60	2,30	2,20			Anderson (1929)
Фэллон		4,30	3,80	2,10	2,10			Anderson (1929)
Путнам	2,70		3,60	3,50	2,30	2,10		Baver and Hall (1937)
Разложившиеся вещества в почве	1,04	1,42	1,42	1,33		0,66	0,44	Baver and Hall (1937)
		3,45	3,31		3,18	3,27		Millar and Turk (1943)
Галлуазит (<2 μm)	2,50		3,50					Beavers and Marshall (1950)
Иллит (<2 μm)	3,30		4,00					Beavers and Marshall (1950)

9.12. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

9.12.1. Основы электрохимического процесса

Электрохимический процесс является продолжением процесса электроосмоса путем введения дополнительных ионов в существующую систему почва–вода с целью повышения ионообменной активности в системе. Увеличение активности ионного обмена будет служить двум целям, как говорилось в разделе 9.2: (1) улучшение стабильности грунта и (2) ускорение удаления нежелательной воды, попавшей в систему почва–вода.

Как обсуждалось в разделах 4.8 и 5.4, ионная активность в системе почва–вода зависит от количества и типов ионов в существующей почве. Если в почве недостаточно ионов, в нее могут быть добавлены дополнительные ионы, такие как алюминий (Al^{3+}), кальций (Ca^{2+}), магний (Mg^{2+}) и т. д. Электрохимическая обработка насыщенных неустойчивых почвенных отложений приносит большее улучшение физических свойств, чем только электроосмос. Основные изменения, затронутые этой обработкой, следующие:

- снижение содержания влаги;
- увеличение удельного веса или плотности почвы;
- снижение гидравлической проводимости;
- увеличение когезии и прочности на сдвиг.

9.12.2. Бюро мелиорации, используемый в США (USBR)

Чтобы добиться экономически успешного применения электроосмотической или электрохимической обработки для улучшения мелкозернистой насыщенной почвы, должны быть сделаны следующие полевые и лабораторные исследования, как предложено в отчете № EM-512 земельной лаборатории USBR.

9.12.2.1. Подходы

1. Получить репрезентативный образец (20–25 кг) обрабатываемого материала.
2. Определить плотность на месте и содержание влаги.

3. Определить физические и физико-химические свойства почвы и поровой воды до и после электрической или электрохимической обработки, то есть определить плотность, влажность, пористость, пределы Аттерберга, ионообменную емкость и т. д. исходной (необработанной) и обработанной почвы.

4. Использовать петрографические исследования с применением рентгеновской дифракции (раздел 4.4) и микроскопического анализа, чтобы определить основные составляющие почвы и пропорции глинистых материалов (каолинит, иллит или монтмориллонит).

5. Определить взаимосвязь между напряжением и гидравлическим напором или градиентом и коэффициентом осмотической проницаемости.

9.12.2.2. Лабораторные условия: расчет осмотической проницаемости и удельного сопротивления

9.12.2.2.1. Осмотическая проницаемость

$$K_e = q_e L/E \text{ cm/s/volt/cm} \quad (9.12)$$

где K_e – осмотическая проницаемость; $q_e = Q_e / t_A$; – удельный расход / единичное время на единицу площади образца; Q_e – объем вытесненной жидкости из почвы при нулевом гидравлическом градиенте по известному показателю ЭДС в наблюдаемое время; L – длина лабораторного образца, см; E – электродвижущая сила (ЭДС), вольт; t – наблюдаемое время, с; A – площадь поперечного сечения образца, см².

9.12.2.2.2. Удельное сопротивление (ρ)

$$\rho = EA/IL \text{ ohm cm} \quad (9.13)$$

где ρ – удельное сопротивление насыщенного грунта; E – напряжение; A – площадь, см²; I – сила тока; L – длина образца, см.

9.12.2.2.3. Условия *in situ*

Применение результатов лабораторных испытаний (этап [2]) для выбранного сопротивления поля (R) и объема потока (Q) осуществляется следующим образом.

9.12.2.2.3.1. Сопротивление поля (R)

$$R = \frac{\rho}{\pi L} 2.303 \text{Log} \frac{d}{r} \Omega \quad (9.14)$$

$$I = \frac{\pi EL}{2.303 \rho L \text{Log} \left(\frac{d}{r} \right)} \text{ A} \quad (9.15)$$

$$E = RI \text{ V} \quad (9.16)$$

9.12.2.2.3.2. Объем сточных вод (Q)

$$Q = \frac{2\pi K_e L H_e}{2.303 \text{Log}\left(\frac{d}{r}\right)} \text{ см}^3 \quad (9.17)$$

где ρ – удельное сопротивление, ом-см; ℓ – длина электродов, см; d – расстояние между электродами, см; r – радиус электрода, см; K_e – коэффициент проницаемости насыщенного грунта, см/с; H_e – гидравлический напор, в см, рассчитанный по выбранному напряжению, полученному из кривой зависимости лабораторных испытаний между напряжениями и гидравлическими напорами, рассчитанными по этим напряжениям (рисунок 9.26).

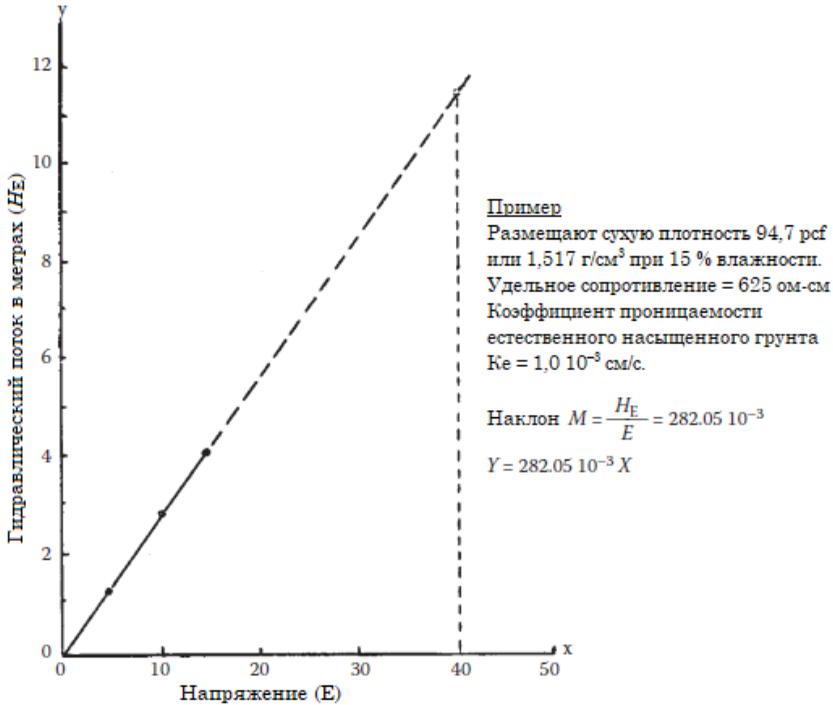


Рисунок 9.26. Соотношение между напряжением и развившимся гидравлическим потоком для заданного коэффициента осмотической проницаемости (по Karroff, K. P. [1976], *New Horizons in Construction Materials*, Enviro Publishing, Bethlehem, PA, pp. 265–273. Reprinted with permission of Enviro Publishers, Bethlehem, PA).

Всякий раз, когда традиционные методы дренажа (раздел 7.3) неэффективны для стабилизации почвы, электрохимический процесс может использоваться для изменения основных свойств почвы. Это можно сделать, используя перфорированный алюминиевый анод и железную дренажную трубу в качестве катода с добавлением примерно 2,5-процентного раствора CaCl_2 или 5-

процентного раствора $AlCl_3$ и с возможным изменением мощности от 5 до 50 кВт/ч/м³.

Электроосмотическая обработка должна применяться к почвам в насыщенных условиях. Осмотический эффект прямо пропорционален объему концентрированной поровой воды. Электрический ток, проходящий через ненасыщенную почву, остается постоянным до тех пор, пока почва не высохнет на аноде, после чего скорость выталкивания «воды» быстро уменьшается.

Обзор обезвоживания и стабилизации почвы электрокинетическим процессом дал Casagrande (1983). Shang и Lo (1996) сообщают об обезвоживании загрязненной воды *in situ* электрокинетическим процессом.

9.13. МНОГОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ НА СИСТЕМУ ПОЧВА–ВОДА

9.13.1. Общее обсуждение

Как говорилось в разделах 2.9 и 9.4, электрическая энергия является центром всех энергетических полей. Таким образом, взаимодействие почвы и воды находится под многоэнергетическим эффектом, включая тепловую, электрическую и магнитную энергии (рисунок 2.3). В этом разделе будет обсуждаться связь между различными энергетическими полями, такими как электровязкое, термоэлектрическое и электромагнитное, показанные на рисунке 9.27.

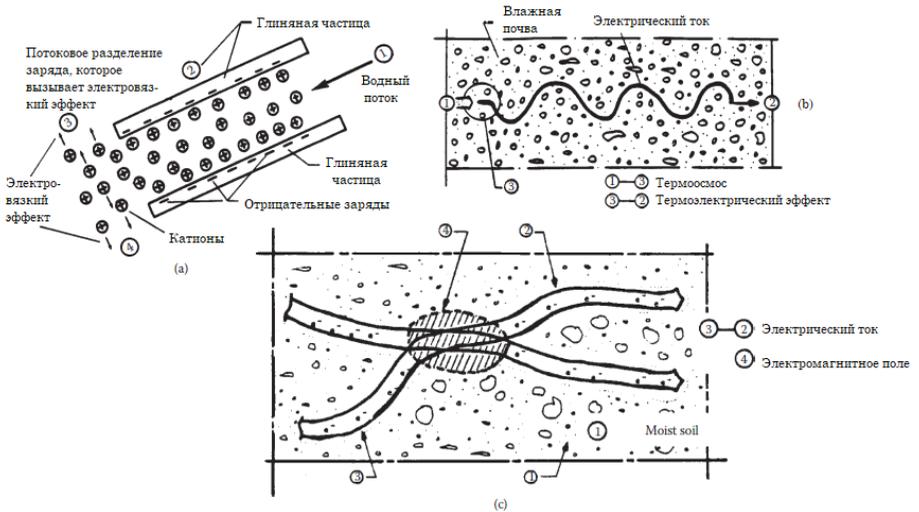


Рисунок 9.27. Схематические диаграммы иллюстрируют многоэнергетическое воздействие на систему почва–вода: (а) электровязкий эффект; (б) термоэлектрический эффект; (с) электромагнитный эффект.

9.13.2. Электровязкий эффект

Электровязкий эффект в системе почва–вода является межсредовой проблемой энергетического поля. Когда вода протекает под гидравлическим градиентом (механическая энергия) в пустотах почвы между отрицательно заряженными минеральными поверхностями (термоэлектрическими энергетическими полями), как показано на рисунке 9.27а, обменные катионы перемещаются вниз по течению и развивается потенциал течения. Это явление, для которого Elton (1948) предположил, что потенциал потока оказывает электрическую тормозящую силу на обменные катионы. Эта замедляющая сила передается в окружающую воду посредством вязкого сопротивления и дополняет нормальное вязкое сопротивление и замедляющую силу. Согласно Michaels и Lin (1955), это явление представляет собой электроосмотический поток в обратном направлении. Результат равен гидродинамическому потоку минус контрэлектроосмотический поток:

$$k^* - k = \frac{\varepsilon^2 \zeta^2}{32 \pi^2 \eta \lambda} \frac{e}{1+e} \quad (9.18)$$

где k^* – проницаемость при отсутствии контрэлектроосмоса; k – кажущаяся проницаемость при встречном электроосмосе; ε – диэлектрическая постоянная; ζ – дзета-потенциал; λ – удельная проводимость (поверхность + раствор); e = коэффициент пустотности.

Street (1959) считает, что потенциал потока ответственен за контрэлектроосмотическое давление, а не противозлектроосмотический поток.

9.13.3. Термоэлектрический эффект

9.13.3.1. Общее обсуждение

Явление термоэлектрического взаимодействия открыл J. T. Seebeck в 1822 году. Открытый им новый метод прямого преобразования тепла в электрическую энергию теперь известен как *эффект Зеебека* или термоэлектрический эффект. Устройство для измерения таких эффектов называется термопарой. Рисунок 9.27b иллюстрирует, что термоосмос и термоэлектрический эффект очень тесно связаны, и их трудно разделить в системе почва–вода. В начале 1940 года Winterkorn и его коллеги (Winterkorn, 1947) провели лабораторные эксперименты на глинах, которые будут представлены в следующих разделах.

9.13.3.2. Лабораторные эксперименты

Винтеркорт и его коллеги провели простой эксперимент. Ряд тепловых, электрических и механических явлений может наблюдаться, если к одному концу хорошо изолированного цилиндрического образца влажного грунта применять горячий электрод, а к другому – холодный. В таком случае движение или смещение воды в образце будет происходить с горячей стороны на холодную. Это явление можно назвать термоосмосом, если мы возьмем термин «осмос» в его первоначальном греческом значении «толкание», не подразумевая конкретной теоретической картины для механизма или механизмов, вовлеченных в этот «толчок».

Актуальная проблема комбинированного тепломассопереноса, которая наблюдается в указанных экспериментальных условиях, является довольно

сложной, как обсуждалось в докладах Совета по исследованиям автомобильных дорог (HRB, 1958). Хотя был предложен ряд механизмов с особым акцентом на перенос паров в случае систем почва–вода–воздух и в пленочной фазе в насыщенных системах почва–вода, ни один механизм не может быть исключительным. Похоже, что природа использует, хотя и в разной степени, каждый механизм, который ученые смогли разработать на основе экспериментальных данных. Некоторые данные лабораторных испытаний тепловых электрических эффектов естественной и гомоионной почв из Хейгерстауна (Нью-Джерси) представлены на рисунке 9.28.

9.13.4. Электромагнитный эффект

9.13.4.1. Общее обсуждение

Как говорилось ранее, тепловые и электрические поля тесно связаны в естественной системе почва–вода. Их распределение в системе происходит случайным образом из-за сложных взаимодействий почвы и воды в окружающей среде. Как показано на рисунке 9.4, движение ионов в системе почва–вода также происходит в случайном порядке. Наблюдалось новое явление: жидкость, протекающая через загрязненную, ненасыщенную мелкозернистую почву, может контролироваться тепловым электромагнитным процессом, о чем сообщил Fang (1991a, 1997). Для демонстрации такого поведения был разработан лабораторный измерительный прибор. Сравнение существующих методов (электрокинетический процесс) и предлагаемого процесса дезактивации почвы показывает, что процесс имеет значительно большую производительность. Источник электромагнитной энергии показан на рисунке 9.27с. Магнитная энергия создается с помощью двух электрических токов, пересекающих друг друга, а затем создается временная электромагнитная сила вблизи электрических зарядов.

9.13.4.2. Характеристики электромагнитной силы

Базовая физика (Beiser, 1988) показывает, что два электрических заряда в состоянии покоя оказывают силы друг на друга в соответствии с законом Кулона. Когда заряды находятся в движении, силы различны, и обычно различия приписывают магнитным силам, возникающим между движущимися зарядами – в дополнение к электрическим силам между ними. Общая сила заряда (Q) может быть разделена на две части: электрическая сила, которая зависит только от значения Q , и магнитная сила, которая зависит от скорости (v) заряда, а также от самого заряда (Q).

В реальных условиях существует одно взаимодействие между зарядами – электромагнитное взаимодействие, в котором присутствует магнитное поле (B), где магнитная сила действует на движущийся заряд. Магнетизм (B) численно равен силе на заряде 1 Кл, движущемуся со скоростью 1 м/с, перпендикулярной B . Электромагнитная индукция – это ток, возникающий в проводнике всякий раз, когда он пересекает магнитные силовые линии.

Электромагнитные волны состоят из связанных электрических и магнитных полей. Они перпендикулярны друг другу. С инженерной точки зрения магнитная сила очень мала по сравнению с электрической силой. Однако с теоретической и практической точек зрения она меняется, становясь из одномерной трехмерной. Следовательно, область влияния или энергетическое поле значительно увеличивается.

Ферромагнетизм является важной характеристикой в электромагнитном энергетическом поле, а также важным параметром для использования при дезактивации почвы путем применения уникальных свойств магнетизма, таких как ферромагнетизм, для идентификации или характеристики различных типов загрязнителей, например, тяжелых металлов, попавших в систему почва-вода.

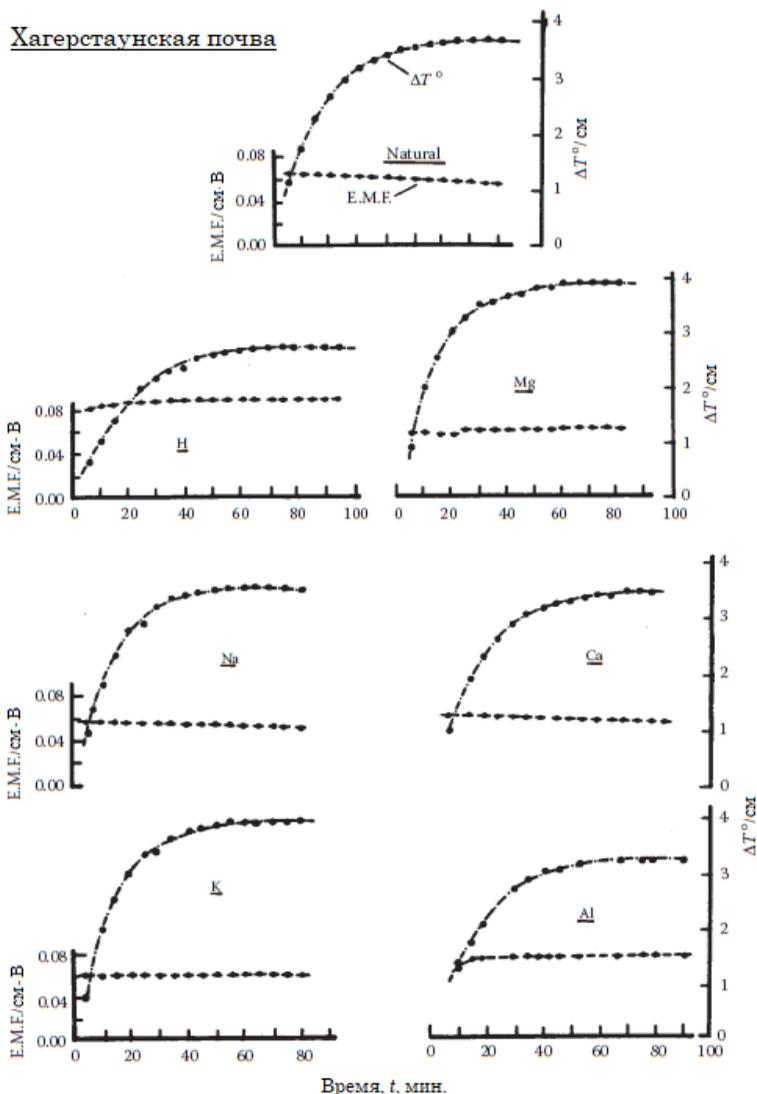


Рисунок 9.28. Сравнение электродвижущей силы (ЭДС) естественной и гомоинной почв из Хейгерстауна, Нью-Джерси (по Winterkorn, H. F. [1958], Mass transport phenomena in moist porous systems as viewed from the thermodynamics of irreversible processes, HRB Special Report 40, pp. 324–338. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе. домен и не подлежит защите авторских прав).

9.13.4.3. Лабораторные эксперименты

На рисунке 9.29 показан простой аппарат. Он является портативным с панелью управления размером приблизительно 500 мм × 500 мм. Размер образца почвы, использованный в эксперименте, составляет 127 мм × 38 мм. Две ячейки, 89 мм × 38 мм, соединены на концах образца почвы с целью контроля электрической энергии. Магнитная энергия создается путем использования двух электрических токов, пересекающихся друг друга, создавая временную электромагнитную силу в окрестности электрических зарядов, как показано на рисунке 9.29 (Fang, 1997).

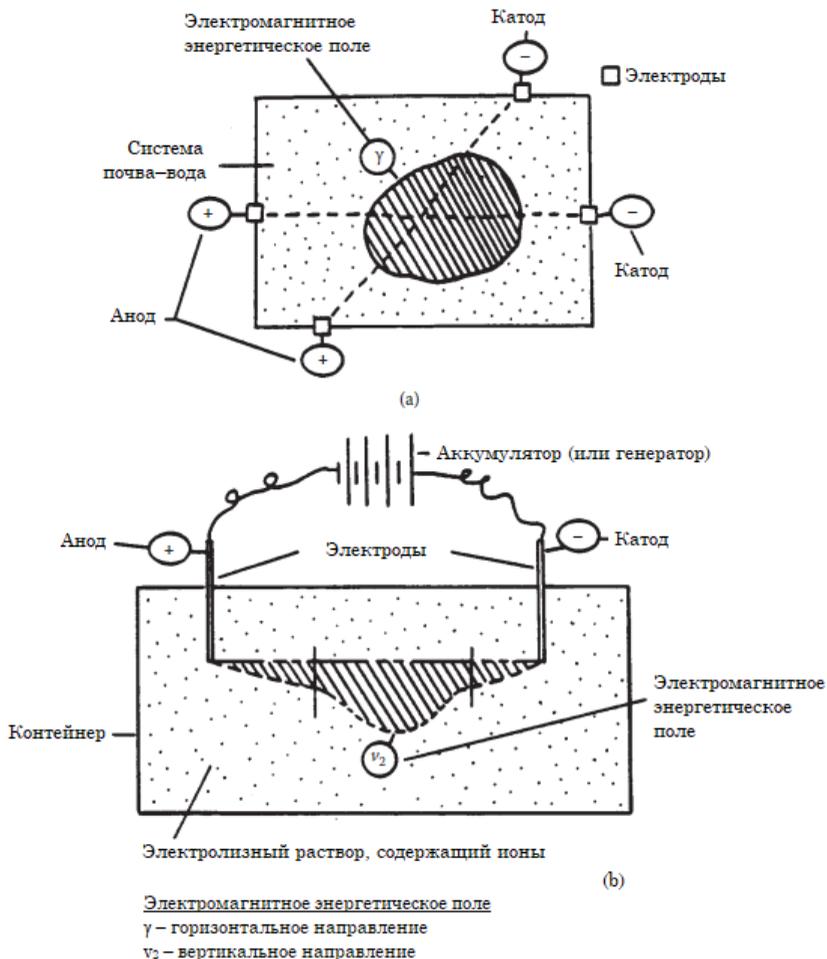


Рисунок 9.29. Электромагнитный процесс в системе вода-почва: (а) вид сверху и (б) поперечное сечение.

9.14. РЕЗЮМЕ

1. Электрическая энергия является центром всех энергетических полей, включая механическое, тепловое, электрическое и электромагнитное энергетическое поле. Взаимодействие почвы и электричества объясняется на основе теории поля энергии частиц.

2. Важность диэлектрической проницаемости для оценки загрязненной системы почва–вода обсуждается вместе с экспериментальными данными для поддержки таких условий. Диэлектрическая проницаемость является лучшим параметром для определения степени загрязнения, чем обычно используемое значение рН.

3. Механизм взаимодействия почва–электричество обеспечивает рациональную основу для лучшего понимания электрохимии, связанной с электрокинетическим процессом. Связь химического состава электродов в системе почва–вода–электричество еще не до конца понятна. Потенциальное использование электрокинетической обработки почв может быть улучшено, если будут разработаны базовые знания по этим вопросам.

4. Обсуждаются механизмы и методы улучшения почвы, обезвоживания и стабилизации почвы электрокинетическим процессом. Обсуждается сравнение механизмов обезвоживания и дезактивации почвы электрокинетическим процессом и возбуждением электромагнитными волнами.

ПРОБЛЕМАТИКА

9.1. Почему удельное электрическое сопротивление имеет большое значение в сухой почве и почему удельное сопротивление уменьшается при намокании почвы?

9.2. Электродвижущая сила (ЭДС) является мерой для силы или энергии? Объясните.

9.3. Почему геометрия электрода важна для измерения электрокинетических явлений в системе почва–вода?

9.4. Почему электроды из металла не подходят для измерения электрокинетических явлений в загрязненной системе почва–вода?

9.5. Каковы преимущества использования графита для электродов в загрязненной системе почва–вода?

9.6. Каковы характеристики диэлектрической проницаемости? Какова связь между рН и диэлектрической проницаемостью? Как измерить диэлектрическую проницаемость для загрязненной системы почва–вода?

9.7. Диэлектрическая проницаемость может указывать как типы ионов, так и концентрации в растворе. Почему так мало ученых используют диэлектрическую проницаемость для обозначения загрязнения? Объясните.

9.8. Объясните механизмы между улучшением почвы и дезактивацией почвы электрокинетическим процессом.

9.9. Каковы ограничения для дезактивации почвы электрокинетическим процессом?

9.10. Обсудите характеристики и механизмы дезактивации почвы электромагнитным процессом.

10. Радиационное воздействие на воду, почву и породы

10.1. Введение

10.1.1. Общее обсуждение

Известно, что около 1500 различных ядер нестабильны. При этом в настоящее время известно только 280 стабильных ядерных изотопов. Характеристики этих нестабильных радиоактивных элементов приведены в таблице 10.1. Нестабильное ядро внезапно и самопроизвольно изменяется, что сопровождается испусканием одной или нескольких быстро движущихся частиц. Такое ядро называется радиоактивным, а его изменения называются радиоактивным распадом. Геотехнические проблемы, связанные с энергетическим полем излучения, можно разделить на четыре основные области:

- контроль радиоактивного и токсичного радонового газа;
- утилизация или обращение с ядерными отходами;
- использование ядерной энергии для крупных строительных работ;
- использование гамма-излучения для использования в качестве метода неразрушающего контроля.

Чтобы решить эти проблемы, мы должны иметь базовые знания в области атомной и ядерной физики, включая атомную, ядерную и молекулярную структуры, процессы радиоактивного распада и взаимодействие грунт–порода в поле энергии излучения.

10.1.2. Обзор базовой ядерной физики и химии

Структуры и свойства ядер атомов являются предметом интереса ядерщиков и физиков, а также инженеров, которые заинтересованы в утилизации ядерных отходов. Для наших целей мы можем считать, что атомные ядра являются агрегатами из ядерных частиц, протонов и нейтронов. Протон и нейтрон называются нуклонами. Другие частицы, такие как электрон, альфа-частица и гамма-фотон, связаны со свойствами ядер.

Атомный номер (Z) атома равен числу протонов (+ e) в его ядре. Хотя все атомы элемента имеют одинаковое количество протонов в своих ядрах, число нейтронов может быть различным. Каждая разновидность ядра, найденная в данном элементе, называется изотопом элемента:



где X – химический символ элемента; A – массовое число изотопов, равное количеству протонов и нейтронов в ядре; Z – атомный номер элемента, равный количеству протонов в ядре.

Масса атома всегда меньше суммы масс протонов, нейтронов и электронов, из которых он состоит. Энергетический эквивалент недостающей массы называется энергией связи ядра. Чем больше энергия связи ядра, тем более она стабильна. Ядра могут быть преобразованы в другие виды путем взаимодействия друг с другом. Поскольку все ядра заряжены положительно, необходимо столкновение между двумя ядрами при высоких энергиях, если они собираются достаточно близко, чтобы среагировать. В любой ядерной реакции общее количество нейтронов и общее количество протонов в продуктах должно быть равно соответствующим количеству частиц, участвовавших в реакциях.

Таблица 10.1. Характеристики нестабильных радиоактивных элементов.

Номер серии	Элемент	Условное обозначение	Атомный номер	Атомный вес	Типы распада		Время полураспада			
					α	β	Годы	Дни	Мин.	S
1	Уран	U	92	238	x		$4,5 \times 10^9$			
2	Торий	Th	90	234		x		24		
3	Протактиний	Pa	91	234		x			1,2	
4	Уран	U	92	234	x		$2,5 \times 10^5$			
5	Торий	Th	90	230	x		$7,6 \times 10^4$			
6	Радий	Ra	88	226	x		1620			
7	Радон	Rn	86	222	x			3,825		
8	Полоний	Po	84	218	x				3,1	
9	Свинец	Pb	82	214		x			27	
10	Висмут	Bi	83	214		x			20	
11	Полоний	Po	84	214		x				$1,6 \times 10^{-4}$
12	Свинец	Pb	82	210		x	22			
13	Висмут	Bi	83	210		x		5		
14	Полоний	Po	84	210	x				138	
15	Свинец	Pb	82	206	Стабильный					

Источник: данные из: Sears, F. W. et al. (1987) College Physics, 6th ed., Addison-Wesley Publ. Co., Reading, MA; Beiser, A. (1988), Applied Physics, McGraw-Hill, New York, p. 238, 280.

10.2. ХАРАКТЕРИСТИКА РАДИОАКТИВНОСТИ

10.2.1. Радиоактивный распад

Некоторые ядра нестабильны и подвергаются радиоактивному распаду, превращаясь в более стабильные. Существуют пять типов радиоактивного распада, а именно гамма-распад, альфа-распад, бета-распад, захват электронов и позиционная эмиссия. Механизмы распада и причины нестабильности обобщены в таблице 10.2. Среди этих пяти процессов распада альфа-распад, бета-распад и гамма-распад тесно связаны с инженерными проблемами – дальнейшие объяснения будут представлены в разделе 10.3.

10.2.2. Период полураспада, средняя продолжительность жизни и активность

Во время процесса радиоактивного распада радиоактивное вещество отделяется от своего родителя, и количество радиоактивных ядер, остающихся с течением времени, уменьшается. Термин «период полураспада» используется для описания таких изменений. Этот период полураспада радиоактивного образца определяется как время, за которое количество радиоактивных ядер уменьшилось до половины при $t = 0$. Используя газ радона ($Rn-222$) в качестве примера, чтобы проиллюстрировать значение половины распада, ниже мы приводим рисунок 10.1, на котором показан процесс радиоактивного распада для радона. Согласно таблице 10.1, время полураспада радона составляет 4 дня (точнее – 3,825 дня). По истечении 4 дней количество оставшихся ядер радона составляет половину числа, присутствующего в начале интервала. По той же причине по истечении 8 дней число оставшихся ядер радона составляет 25 % от числа, которое было в начале интервала.

Таблица 10.2. Характеристики радиоактивного распада

Тип распада	Событие распада	Причина нестабильности
Гамма-распад	Излучение гамма-лучей снижает энергию ядра	Ядро имеет избыточную энергию
Альфа-распад	Эмиссия альфа-частицы уменьшает размер ядра	Ядро слишком большое
Бета-распад	Эмиссия электрона ядерным протоном	Ядро имеет слишком много нейтронов относительно количества протонов
Электронный захват	Захват электрона ядерным протоном превращает его в нейтрон	Ядро имеет слишком много протонов относительно количества нейтронов
Позитронная эмиссия	Излучение позитрона ядерным протоном превращает его в нейтрон	Ядро имеет слишком много протонов относительно количества нейтронов

Источник: основано на данных: Beiser, A. (1988), Applied Physics, McGraw-Hill, New York, p. 238, 280; и другие.

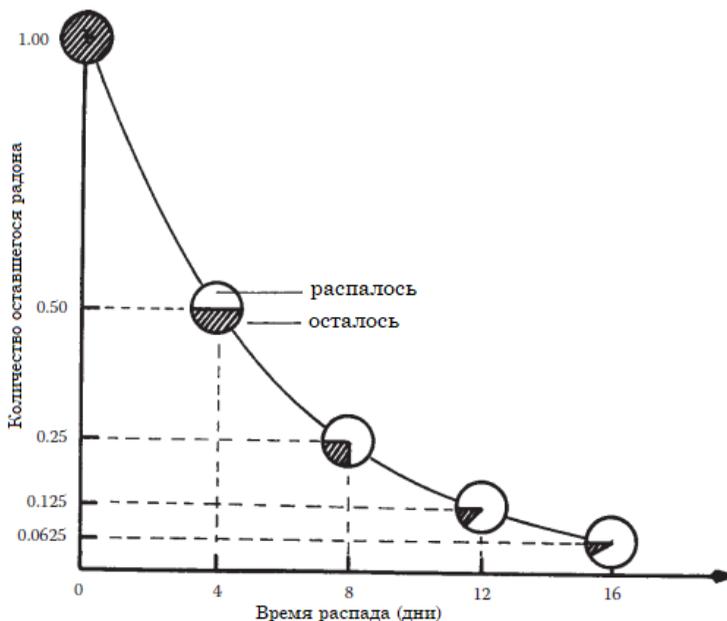


Рисунок 10.1. Кривая радиоактивного распада для радонного газа (Rn-222), период полураспада составляет 4 дня (точнее – 3,825 дня).

Среднее время жизни ядра или нестабильной частицы связано с его периодом полураспада (Sears и соавторы, 1987). В физике элементарных частиц жизнь нестабильной частицы обычно описывается в терминах среднего времени жизни, а не периода полураспада. Термин активность часто используется для описания количества распадов в единицу времени. Обычно используемой единицей для этого является кюри (Ки, Ci). Единицей активности в системе СИ является Беккерель (Бк, Bq).

10.2.3. Единицы радиоактивности

10.2.3.1. Кюри (Ки)

Кюри радиоактивности представляет $3,7 \times 10^{10}$ событий распада в секунду. Первоначально один кюри (1 Ки) означал количество распадов в секунду, происходящих в 1 г радия (Ra-226), но понятие было расширено и стандартизировано и теперь означает точно $3,7 \times 10^{10}$ распадов в секунду любого радиоактивного материала. Пикокюри составляет 1 триллион кюри и обычно используется для измерения радонного газа. Стандартные лабораторные источники обычно составляют около 10^{-6} или 1 Ки (микрокюри):

$$10^{-6} \text{ кюри} = 1 \text{ Ки (микрокюри)}$$

$$10^3 \text{ кюри} = 1 \text{ кКи (килокурье)}$$

$$10^6 \text{ кюри} = 1 \text{ мКи (мега кюри)}$$

10.2.3.2. Беккерель (Бк)

Один Бк – одна дезинтеграция в секунду ($1 \text{ Бк} = 1 \text{ с}^{-1}$).

10.2.3.3. Атомная единица массы (а.е.м., АМУ, u)

Атомная единица массы – это единица измерения массы атомов и молекул. 1 а.е.м. определяется как масса атома углерода, ядро которого состоит из шести протонов и шести нейтронов: ^{12}C .

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ кг}$$

$$= 1,49 \times 10^{-10} \text{ Дж}$$

$$= 931 \text{ МэВ}$$

$$\text{Масса протона} = m_p = 1,0073 \text{ а.е.м.}$$

$$\text{Масса нейтрона} = m_n = 1,0087 \text{ а.е.м.}$$

Пример 10.1

Определение молекулярной массы воды (H_2O)

Решение

$$= 2 \times (\text{атомная масса водорода}) + 1 \times (\text{атомная масса кислорода})$$

$$= (2 \times 1 \text{ а.е.м.}) + (1 \times 16 \text{ а.е.м.}) = 18 \text{ а.е.м.}$$

Другими связанными единицами излучения являются *Rad* и *Rem*. *Rad* – это единица измерения, которая используется для определения количества энергии излучения, поглощаемой объектом. $1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Дж/кг}$. *Rem* – это устройство, которое используется для измерения дозы облучения в живой ткани.

10.3. РАДИОАКТИВНЫЙ ПРОЦЕСС РАСПАДА

10.3.1. Общее обсуждение

Как говорилось в предыдущем разделе, радиоактивность – это свойство, благодаря которому некоторые вещества могут самопроизвольно превращаться в другие вещества в результате эмиссии альфа-частиц или бета-частиц из их ядер. Радиоактивность не зависит от температуры, давления или химической формы. В различных процессах радиоактивного распада испускаются частицы (ядра He-4), электроны и лучи (фотоны высоких энергий). Когда эти частицы попадают в кусок материи, энергия передается материалу в результате столкновений с атомами в материале. Эти взаимодействия приводят к выбросу электронов из атомов и, следовательно, к образованию ионов в материале. Эта ионизация, в свою очередь, вызывает химические реакции и общий нагрев поглощающего материала. Есть несколько различных причин, как показано в таблице 10.2; однако некоторые дополнительные объяснения представлены следующим образом.

10.3.2. Законы о сохранении и процесс радиоактивного распада

10.3.2.1. Законы о сохранении в радиоактивном распаде

Законы сохранения при радиоактивном распаде основаны на двух фактах о процессе радиоактивного распада, поскольку (1) общее число протонов и нейтронов остается неизменным во время того, как распад происходит; (2) общий электрический заряд одинаков до и после распада. Например, массовое число Ra-226 (радий) равно сумме массового числа Rn-222 (радон) и He-4 (гелий) [$222 + 4 = 226$]. При распаде Ra-226 присутствует 88 протонов до распада и $86 + 2 = 88$ после распада.

10.3.2.2. Процесс радиоактивного распада

10.3.2.2.1. Альфа-излучение (α)

Альфа-частицы имеют чрезвычайно высокое ионизирующее действие в пределах своего диапазона; они состоят из двух протонов и двух нейтронов. Когда они излучаются из ядра, электроны нейтрализуются. Когда они электрически стабильны, альфа-частицы становятся атомами гелия (He). Когда альфа-частица проходит сквозь вещество, она проходит по прямой линии, оставляя на своем пути высокую плотность ионов (Marion, 1976).

10.3.2.2.2. Бета излучение (β)

В процессе бета-распада из ядра испускается электрон. Удаление отрицательного заряда из ядра означает, что заряд ядра увеличивается на одну единицу, в положительную сторону (на +e). Бета-частицы демонстрируют относительно низкие уровни энергии; они могут двигаться дальше и быстрее, чем альфа-частицы, но, подобно альфа-частицам, быстро ослабляются тонким слоем твердого материала. Бета-излучение состоит из отрицательно заряженных частиц, движущихся со скоростями от 30 % до 99 % скорости света.

10.3.2.2.3. Гамма излучение (γ)

Гамма-лучи часто испускаются ядрами после радиоактивного альфа- или бета-распада. Гамма-излучение – это пучок фотонов очень высокочастотного электромагнитного излучения. Это кванты энергии, очень похожие на рентгеновские по своей скорости и природе. Однако, в то время как рентгеновские лучи возникают в электронных оболочках атомов, гамма-лучи исходят из ядра. Гамма-лучи имеют самый высокий уровень энергии радиоактивного распада с высокой скоростью перемещения и большей проникающей способностью. Единицей гамма-излучения является фотон.

10.3.3. Энергии излучения

Поскольку альфа- и бета-частицы имеют массу, а гамма-излучение – нет, можно создать единую систему выражения энергий, используя формулу эквивалентности энергии–массы Эйнштейна:

$$E = mc^2 \quad (10.2)$$

где E – энергия, г·см/с или эрг (более удобной единицей энергии для ядерных частиц является электрон-вольт, эВ); m – масса частицы в граммах; c – скорость света ($2,998 \times 10^{10}$ см/с).

Электрон-вольт (эВ) – это энергия, необходимая для поднятия одного электрона на разность потенциалов в один вольт. Коэффициент преобразования составляет $1 \text{ эВ} = 1,602 \times 10^{-19}$ эрг. Энергии альфа- и бета-частиц и гамма-фотонов колеблются от нескольких тысяч до нескольких миллионов электрон-вольт. По этой причине энергии обычно выражаются в миллионах электрон-вольт (МэВ).

10.4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УРАНА И РАДИЯ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

10.4.1. Уран и радий

10.4.1.1. Уран (U)

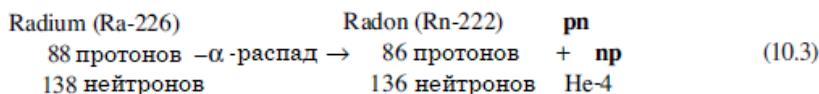
Уран – это элементарный металл, символ U. Удельный вес металла составляет 18,68, а атомный вес – 238,2. Температура плавления составляет около 1860°C. Уран тяжел, но пластичен. В химическом отношении уран имеет ряд изотопов, и его атомный вес варьируется от 234 до 239. Он имеет самый высокий атомный вес среди любых материалов, встречающихся в природе в естественных условиях, и составляет 92 по шкале периодов. Уран крайне нестабилен, и его можно заставить распадаться со взрывным насилием. У урана много разных применений. Соединения урана, особенно оксиды урана, используются для изготовления лазурей в керамической промышленности, а также для пигментов краски.

10.4.1.2. Радий (Ra)

Радий – это радиоактивный элемент, открытый в 1898 году Кюри. Радий коммерчески выгодно добывать только из урановых руд; считается, что он образуется в результате распада урана или иона. Соотношение радия (Ra) к урановой (U) руде всегда составляет около 1:3000000. Радий продается в форме бромидов или сульфатов в пробирках и в этих формах чрезвычайно радиоактивен. Другие нестабильные элементы включают торий (Th), полоний (Po), свинец (Pb) и т. д., как указано в таблице 10.1. Рисунок 10.2 представляет собой график, основанный на данных из таблицы 10.1. На графике представлена зависимость атомного веса от атомного номера урана.

10.4.2. Взаимосвязь урана, радия и радона

Как указано в таблице 10.1 и на рисунке 10.1, газ радона получают из урана (U) и радия (Ra). Это альфа-тип процесса распада, как показано в уравнении 10.3.



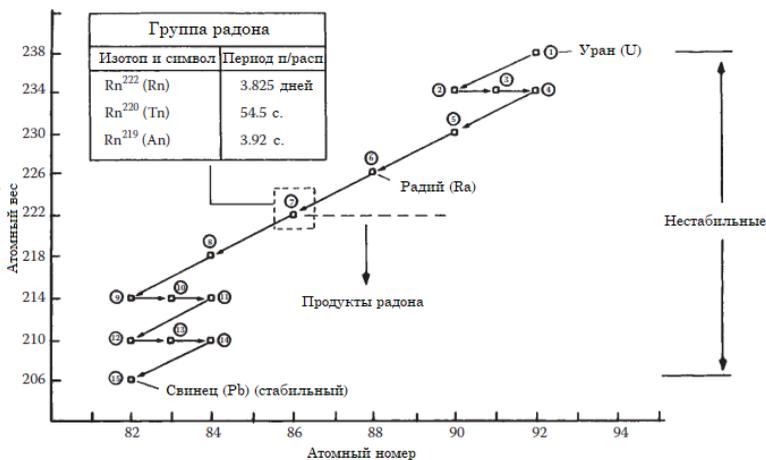


Таблица 10.2. Атомный вес в зависимости от атомного номера уранового ряда. (Данные из таблицы 10.1.)

Уравнение 10.3 может быть переписано в ядерное уравнение:



Как указано в уравнениях 10.3 и 10.4, ядро радия ($Z = 88$; $A = 226$) имеет 88 протонов и 138 нейтронов. Когда Ra-226 испускает альфа-частицу (He-4), два протона (p) и два нейтрона (n) уносятся. Следовательно, остаточное ядро имеет 86 протонов и 136 нейтронов. Продукт распада радия (дочерний элемент) – это другой элемент: радон ($Z = 86$). Электронная структура атома изменится после события распада, чтобы приспособиться к новому ядерному изменению, выпуская два из его 88 электронов. Эти два электрона в конечном итоге присоединяются к испускаемой альфа-частице и образуют нейтральный атом He-4. Таким образом, исходный нейтральный атом радия (Ra) распадается и образуются два нейтральных атома, один радон (Rn) и один гелий (He).

10.5. СЕМЕЙСТВО БЛАГОРОДНЫХ ГАЗОВ

10.5.1. Характеристики благородных газов

Существует шесть общеизвестных благородных газов, а именно: гелий (He), неон (Ne), аргон (Ar), криптон (Kr), ксенон (Xe) и радон (Rn). Все это газы имеют очень низкие температуры кипения и плавления. Все благородные газы являются инертными, то есть не имеют химического или биологического действия. Их стабильные химические соединения образуются в Радиационной лаборатории Лоуренса Калифорнийского университета в Беркли с 1962 года (Bartlett, 1962).

Важное различие между благородными газами и обычными газами состоит в том, что благородные газы существуют как атом (неатомная молекула). Все остальные газообразные вещества, такие как водород (H), азот (N), кислород (O) и хлор (Cl), встречаются в виде двухатомных (двухатомных) молекул.

Общие свойства этих благородных газов представлены в таблице 10.3. Все благородные газы имеют расположение валентных электронов, при котором все (s) и (p) орбитали в валентной оболочке заполнены электронами.

На основании данных из таблицы 10.3, построен график зависимости атомного веса от атомного номера и от энергии ионизации благородных газов (см. рисунок 10.3). Указано, что радон (Rn) имеет самый высокий атомный номер ($Z = 86$) и атомный вес ($A = 222$) и также имеет самую низкую энергию ионизации (10,7 эВ).

Таблица 10.3. Сравнение физико-химических свойств благородных газов.

Название	Гелий	Неон	Аргон	Криптон	Ксенон	Радон
Символ	He	Ne	Ar	Kr	Xe	Rn
Атомный номер	2	10	18	36	54	86
Атомный вес	4,00	20,18	39,95	83,80	131,30	222
Валентные электроны	$1s^2$	$2s^22p^6$	$3s^23p^6$	$4s^24p^6$	$5s^25p^6$	$6s^26p^6$
Радиус атома, Å	—	1,60	1,92	1,97	2,17	—
Температура плавления, °C (под давлением)	-272	-249	-189	-157	-112	-71
Температура кипения, °C	-269	-246	-186	-152	-107	-62
Энергия ионизации, эВ ^a	24,6	21,6	15,8	14,0	12,1	10,7
Цвет	Желтый	Красный	Красный и синий	Желто-зеленый	Сине-зеленый	Бесцветный

^a Данные из: Porterfield, W. W. (1972), Concepts of Chemistry, W. W. Norton & Co., New York; Allinger, N. L. et al. (1976), An Introduction to General, Organic and Biological Chemistry, Wadsworth Publishing, Belmont, CA.

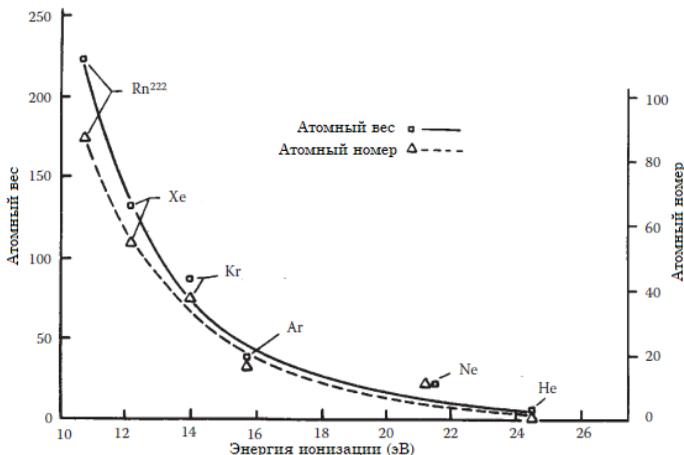


Рисунок 10.3. Атомный вес и атомный номер в зависимости от энергии ионизации благородных газов (данные об энергии ионизации взяты из: Allinger, N. L. et al. [1976], An Introduction to General, Organic and Biological Chemistry, Wadsworth Publishing, Belmont, CA).

Энергии ионизации более тяжелых элементов, таких как He и Ne из семейства благородных газов, не особенно высоки, они примерно такие же, как у кислорода (O), и ниже, чем у фтора (F). Поэтому теоретически возможно, что Kr, Xe и Rn

могут образовывать соединения. В 1962 году доктору Бартлетту из Радиационной лаборатории им. Лоуренса удалось приготовить первый такой состав. Вскоре после этого открытия было получено кристаллическое твердое вещество путем нагревания Хе и F вместе при 400°C. Впоследствии сообщалось о многих соединениях Хе и нескольких соединениях Кг и Rn.

10.5.2. Радон и радоновое семейство

Из всех шести известных благородных газов радон (Rn) обладает наиболее уникальными характеристиками и наименее изучен в области проблемы загрязнения различных сред. Этот газ представляет интерес не только для физиков, химиков и биологов, но и для инженеров-практиков. Для его изучения нужен междисциплинарный подход, и поэтому необходимо взаимодействие ученых и инженеров. В таблице 10.4 представлены основные характеристики частиц, относящихся к семейству радона, включая элементы-родители, уран (U-238) и радий (Ra-226), «братьев», торон (Rn-220) и актинон (Rn-219), и дочерний элемент – полоний (Po-218).

Радон (Rn) является единственным благородным газом, напрямую связанным с ураном (U) и радием (Ra). Рисунок 10.4 иллюстрирует взаимосвязь этих элементов в поле тепловой энергии.

Как указано в уравнении 10.1, радон представляет собой распад альфа-частиц. Криптон (Kr-93) является бета-распадом, период его полураспада составляет около 1,29 с. Неон (Ne) является гамма-распадом, это проиллюстрировано следующим образом:

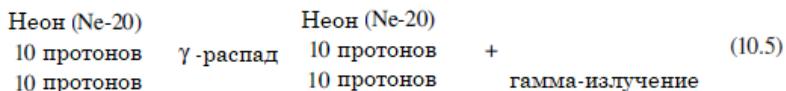


Таблица 10.4. Основы характеристик частиц, относящихся к группе радона.

Группа радона	Элемент	Протон	Нейтрон	Состояние
Родитель	Уран (²³⁸ U)	92	146	Твердое
	Радий (²²⁶ Ra)	88	138	Твердое
Радон	Радон (²²² Rn)	86	136	Газообразное
	Торий (Tn) (²²⁰ Rn)	86	134	Газообразное
	Актин (An) (²¹⁹ Rn)	86	133	Газообразное
Продукт	Полоний (218Po)	84	134	Твердое



Таблица 10.4. Взаимосвязь U, Ra и Rn в поле тепловой энергии.

10.6. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

10.6.1. Общее обсуждение

Как упоминалось ранее, для геотехнологии окружающей среды представляют интерес три основных радиационных элемента. Геогидрологические и гидрогеологические характеристики этих трех основных элементов представлены в таблице 10.5. Как указано в таблице 10.5, есть три вида поясов, а именно: окислительный, окислительно-восстановительный и восстановительный. Окислительный пояс, который находится близко к поверхности земли, более активен в окружающей среде, чем два других пояса. Кроме того, взаимодействие воды с излучением является наиболее важным и будет обсуждаться более подробно в следующем разделе.

10.6.2. Взаимодействие воды – радиационное излучение

Радиоактивные элементы, существующие в подземных водах, связаны с их источниками, как указано в таблице 10.6. Поверхностные воды содержат небольшое количество U и Ra по сравнению с подземными водами из близлежащей урановой шахты. Это особенно заметно для Rn. На рисунке 10.5 показаны расход и снижение уровня в зависимости от времени для U и Rn. При рассмотрении рисунка 10.5 указываются признаки того, что в течение первых нескольких часов содержание Rn в воде составляет лишь небольшое количество, а затем оно значительно увеличивается.

Радиоактивность существенно влияет на химический состав воды. На рисунке 10.6 представлено влияние химического состава воды на содержание урана в воде. На рисунке 10.6a показано содержание урана в сравнении с ионом гидрокарбоната в воде, и обнаруживается линейная зависимость. На рисунке 10.6b показано содержание урана в сравнении с кислородом и дигидросульфидом. Здесь наблюдается нелинейная зависимость. Рисунок 10.7 показывает содержание радона в зависимости от содержания урана в воде. На рисунке 10.8 представлена взаимосвязь между концентрацией Ra-226 и общим количеством растворенных минералов в подземных водах. На рисунке 10.9 представлено соотношение Rn в воде и воздухе и температуры. Тут также нелинейная зависимость.

Таблица 10.5. Геогидрологические / гидрогеологические характеристики урана, радия и радона.

Отдел	Развитие. Глубина (м)	Динамика подземных вод. Условия движения	Тип воды	E_h (эВ)	pH	$\frac{Fe^{2+}Fe^{3+}}{мг/л}$	$Fe^{2+}Fe^{3+}$	Уран (U) (г/л)	Радий (Ra) (г/л)	Радон (Rn) (а.е.м.)	
Окислительный пояс											
Сильный	5/70	Сильная обменная емкость	HCO ₃ ⁻ Са или HCO ₃ ⁻	529–384	≤7,2	0–2,0	0,2–38,0	0–0,4	$n \times 10^{-7}$ – $n \times 10^{-5}$	<1,96 × 10 ⁻¹²	5050–204
Слабый	35–125		Са – Mg	384–250	7,0–7,4	0,1–9,0	0,5–11,0	0,4–0,85	$n \times 10^{-6}$ – $n \times 10^{-3}$	$1,96 \times 10^{-12}$ – $8,27 \times 10^{-12}$	204–30
Окислительно-восстановительный пояс	50–275	Медленная обменная емкость	HCO ₃ ⁻ Са – Mg, HCO ₃ ⁻	250–0	7,2–7,7	0,5–18,0	0,5–2,5	0,7–3,0	$n \times 10^{-6}$ – $n \times 10^{-4}$	$8,27 \times 10^{-12}$ – $5,12 \times 10^{-11}$	60–0
Пояс редуцирования		Очень медленная или нет обменной емкости	SO ₄ ⁻ Са-Mg HCO ₃ ⁻ Са – Mg, HCO ₃ ⁻ Са – Mg-Na	0–201	7,0–7,5	1,5–18,0	0–1,5	> 1,5	$n \times 10^{-7}$		40–0

Источник: Kao, S. and Sun, G. F. (1983). Cited by Fang (1989b), ASCE Environmental Engineering 1989 Specialty Conf., ASCE, New York, pp. 97–104 and (1990), 83rd Annual Meeting and Exhibition, Air and Waste Management Association, Paper no. 90-153.10, Pittsburgh, PA, June, 19 p.

Таблица 10.6. Сравнение содержания урана (U), радия (Ra) и радона (Rn) в подземных водах.

Содержание / источники подземных вод	Уран (U) (г/л)			Радий (Ra) (г/л)			Радон (Rn) (а.е.м.)		
	Min	Max	Среднее	Min	Max	Среднее	Min	Max	Среднее
Поверхностные воды (река)	2×10^{-8}	5×10^{-5}	6×10^{-7}	$2,5 \times 10^{-13}$	$4,2 \times 10^{-12}$	2×10^{-13}	0	0	0
Под осадочной горной породой	2×10^{-7}	8×10^{-6}	5×10^{-6}	$1,0 \times 10^{-12}$	$6,0 \times 10^{-12}$	2×10^{-12}	1	50	15
Под гранитной скалой	2×10^{-7}	3×10^{-5}	7×10^{-6}	$1,0 \times 10^{-12}$	$7,0 \times 10^{-12}$	2×10^{-12}	10	400	100
Под урановым рудником	5×10^{-5}	9×10^{-2}	6×10^{-4}	$8,0 \times 10^{-12}$	$2,0 \times 10^{-11}$	8×10^{-11}	50	50 000	10000

а.е.м. – атомные единицы массы.

Источник: данные из: Fang, H. Y., Lou, G. Y., and Chu, T. G. (1987), Proc. 1st Int. Symp. on Environmental Geotechnology, v. 2, pp. 219–231.

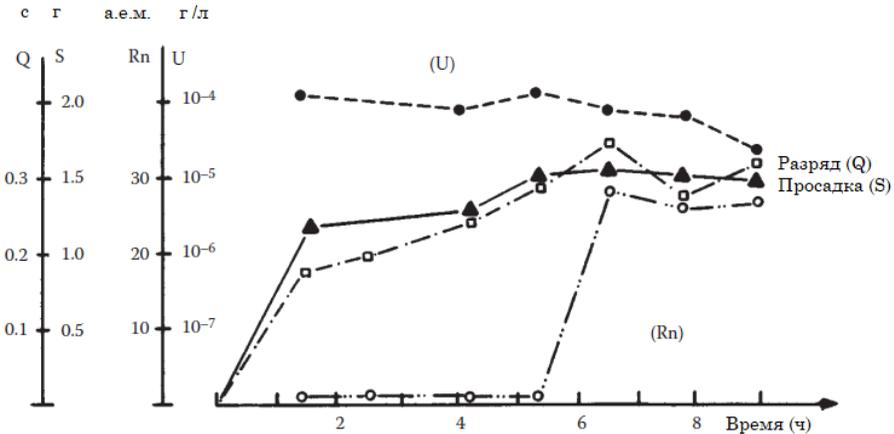


Рисунок 10.5. Разряд и просадка в зависимости от времени для содержания урана (U) и радона (Rn).

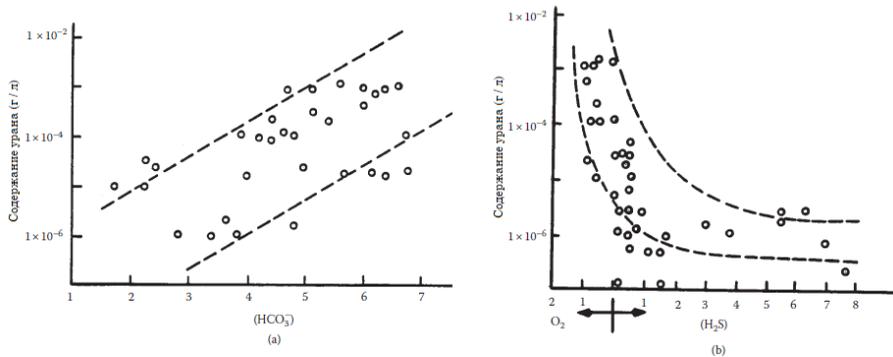


Рисунок 10.6. Влияние химического состава воды на содержание урана в воде: (a) содержание урана в зависимости от содержания HCO_3^- в воде и (b) содержание урана в зависимости от O_2 и HS^- в воде (по Liao [1983] cited by Fang [1989b], ASCE Environmental Engineering 1989 Specialty Conf. ASCE, New York, pp. 97–104).

10.6.3. Взаимодействие горных пород и грунтов

10.6.3.1. Горные породы

Горная масса имеет тенденцию к адсорбции газа. В таблице 10.7 представлены данные лабораторных испытаний пяти типов пород, пропитанных загрязненной ураном водой в течение 24 и 48 часов. Результаты измеряются по содержанию урана и значениям E_b . Существуют значительные различия между 24- и 48-часовым периодом выдержки. В таблице 10.8 представлены радиоактивные элементы в различных типах пород: как в магматических, так и в осадочных. Три параметра включают U, Ra и Rn. Между этими параметрами наблюдаются существенные различия.

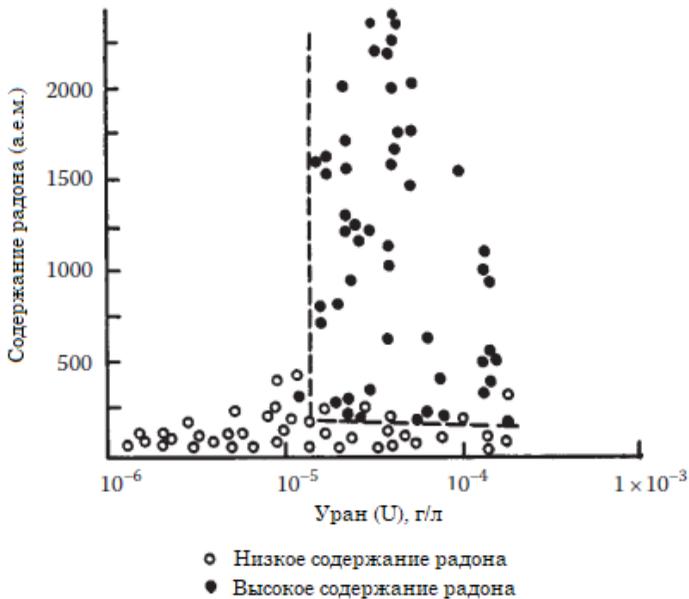


Рисунок 10.7. Содержание урана в сравнении с содержанием радона в воде (по Liao [1983] cited by Fang [1989b], ASCE Environmental Engineering 1989 Specialty Conf., ASCE, New York, pp. 97–104).

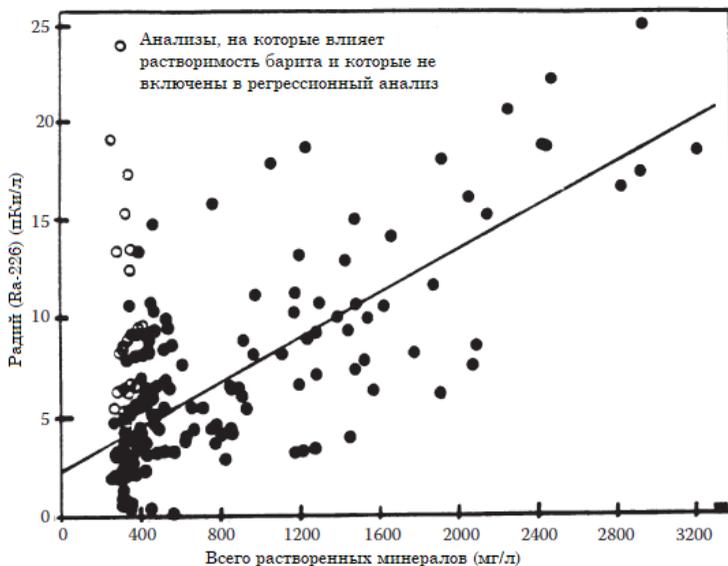


Рисунок 10.8. Соотношение между концентрацией Ra-226 и общим количеством растворенных минералов в подземных водах (местоположение: Шампейн, Иллинойс). (По Gilkeson, R. H. and Cowart, J. B. [1987], Radon in Groundwater, Lewis Publishing, Chelsea, MI, pp. 403–422.)

10.6.3.2. Почва

Большинство измерений радона, проводимых в подповерхностном грунте, проводятся на почвенном газе, извлеченном из труб различной длины и помещенном в скважины диаметром около 10 см и глубиной до 180 см, как пишут Rose и соавторы (1988). Каждая трубка имеет окошко на своем нижнем конце. Песок помещается в скважину примерно на 4 см выше экранированного конца трубки. Секции скважины с отверстиями между впускными отверстиями труб заполнены влажной каолиновой глиной для разделения точек отбора проб. И песок, и глина анализируются на содержание радона. На рисунке 10.10 представлены типичные результаты летнего периода для Rn-222 и Rn-220 в слое почвы в известняковом регионе Центральной Пенсильвании.

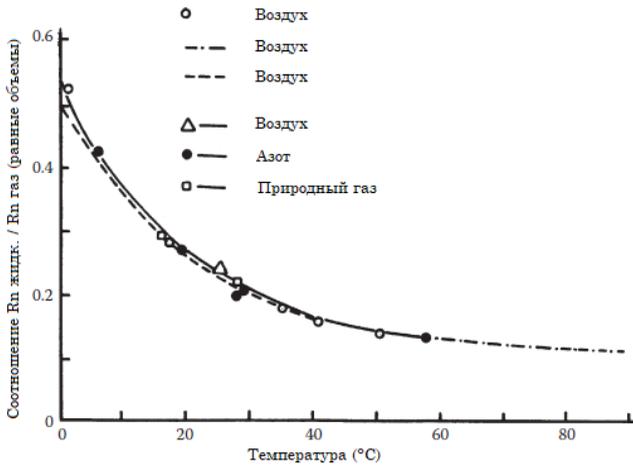


Рисунок 10.9. Влияние температуры на распределение радона / воды (по Cameron, C. P. [1987], A Review of Radon Emanation and Mobilization in Minerals and Rocks, Waterways Experiment Station, Report no. MSSGL-87-27, 42 p. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в свободном доступе и не подлежит защите авторских прав).

Таблица 10.7. Адсорбционные характеристики некоторых осадочных пород, связанные с содержанием урана

Характеристики образцов горных пород	Испытание адсорбции: образцы, пропитанные водой			
	24 ч.		48 ч.	
	Содержание урана (г/л)	E_h (mV)	Содержание урана	E_h (mV)
Углеродный конгломерат и брекчия	$4,5 \times 10^{-6}$	419	$3,5 \times 10^{-8}$	394
Брекчия содержит мало углекислого вещества	1×10^{-5}	419	7×10^{-6}	399
Углеродно-органическая глина	$6,5 \times 10^{-6}$	419	6×10^{-6}	414
Известковый песчаник и известняк	$1,5 \times 10^{-5}$	439	1×10^{-5}	404
Карбонатная брекчия белого цвета	2×10^{-5}	490	$1,9 \times 10^{-5}$	470

Примечание: все образцы для испытаний имеют одинаковый вес = 100 г. Объем воды содержит уран, всего 0,5 л. Перед испытанием (1) содержание урана в воде для всех образцов = 2×10^{-5} г/л; (2) электрический потенциал (E_h) для всех образцов = 498 мВ.

Источник: данные выбраны из: Kao and Sun (1983). Cited by Fang, H. Y.(1989b), ASCE Environmental Engineering 1989 Specialty Conf., ASCE, New York, pp. 97–104; Fang, H. Y. (1995b), 83rd Annual Meeting and Exhibition, Air and Waste Management Association, Paper no. 90–153.10, Pittsburgh, PA, June, 19 p.

10.7. РАДИОАКТИВНО-ТОКСИЧЕСКИЙ ГАЗ РАДОН

10.7.1. Природа радонового газа

10.7.1.1. Общее обсуждение

Радиоактивный и токсичный газ радон (Rn) естественным образом образуется в земле в результате нормального распада урана (U) и радия (Ra) и широко распределяется в следовых количествах по всей земной коре. Это бесцветный, без запаха и вкуса элемент, как указано в таблице 10.3. Большая часть радонового газа сосредоточена в окислительном поясе, который находится на относительно небольшой глубине от поверхности земли. В нормальных условиях некоторое количество радона просачивающегося в атмосферу или в жилые здания, но в количествах, которые не вредны для здоровья человека. Как обсуждалось в главе 1, в последние годы многие природные сельскохозяйственные угодья, леса и водно-болотные угодья были уничтожены в результате преобразования в жилые и промышленные объекты: следовательно, такие строительные работы изменяют динамическое равновесие экосистемы, что, в свою очередь, запускает и ускоряет выделение радона и увеличивает содержание газа в окружающей среде. Это изменение является основной причиной повышения концентрации газа в помещении, данная проблема стала распространенной в последние годы. Последние данные показывают, что газ радон не является полностью инертным элементом, как считалось ранее (Fang, 1989b). На него в некоторой степени влияют местные условия, такие как температура, влажность, значение pH, ионообменная реакция, окислительно-восстановительная реакция и т. д. Кроме того, газообразный радон может быть обнаружен в грунтовой почве, воде, воздухе и других средах, становясь сложным загрязнителем разных сред.

Таблица 10.8. Содержание радиоактивных элементов в породах различного типа

Тип горной породы	Уран (%)	Радий (%)	Радон (%)
<i>Вулканическая порода</i>			
Гранитная	$4,0 \times 10^{-4}$	$1,40 \times 10^{-10}$	$7,6 \times 10^{-6}$
Основная	$1,2 \times 10^{-4}$	$0,47 \times 10^{-10}$	$1,7 \times 10^{-10}$
Ультраосновный	$0,7 \times 10^{-4}$	$0,20 \times 10^{-10}$	$6,5 \times 10^{-10}$
<i>Осадочная порода</i>			
Известняк	$1,5 \times 10^{-4}$	$0,50 \times 10^{-10}$	
Песчаник	$4,0 \times 10^{-4}$	$0-1,50 \times 10^{-10}$	$6,5 \times 10^{-4}$
Аргиллит	$3,0 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-10}$	
Глина	$4,3 \times 10^{-4}$	$1,30 \times 10^{-10}$	

Источник: Luo, G. Y. et al. (1991), Proc. 2nd Proc. 2nd Int. Symp. on Environmental Geotechnology, v. 2, pp. 229–241.

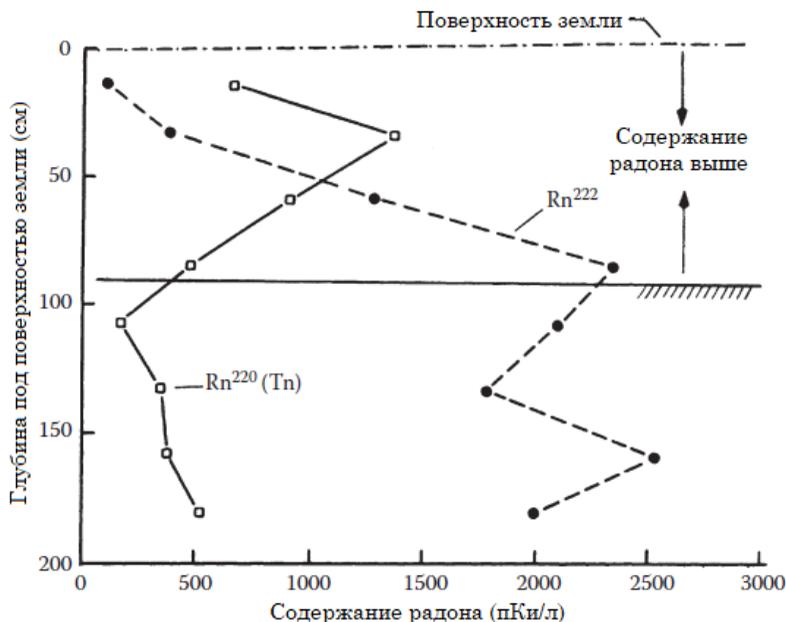


Рисунок 10.10. Типичные результаты летнего периода для Rn-222 и Rn-220 в слое почвы в Университетском парке, Пенсильвания (по Rose, A. W., Washington, J. W., and Greeman, D. J. [1988], *Northeastern Environ. Sci.*, v. 7, n. 1, pp. 35–39).

Радоновый газ сам по себе не является серьезной проблемой для здоровья человека. Однако, если радон продолжает подвергаться радиоактивному распаду, он производит новые природные радиоактивные материалы. Эти новые материалы, которые являются твердыми, а не газообразными, могут прилипать к поверхностям, таким как частицы пыли (раздел 3.8) в воздухе, и, таким образом, эти загрязненные частицы пыли могут вдыхаться и оседать на поверхности легких человека или животного. Кроме того, они могут прилипать к деревьям, цветам или другой растительности и становиться загрязнителем природы и нашей повседневной среды.

Исходное ядро называется родительским ядром, а остаточное ядро – дочерним. Поэтому потомки радонового газа называются радоновыми дочерьми или радоновым потомством. Продукт адон (Po) также может прилипать непосредственно к легким. Несколько дочерей радона испускают альфа-излучение, которое имеет высокую альфа-энергию в результате радиоактивного распада, и воздействуют на легкие. Недавние исследования (NAS, 1988) показывают, что результат длительного воздействия высоких уровней радона или дочери радона увеличивает риск рака легких.

Радоновый газ проникает в подвальные сооружения через земляные полы, отстойные насосы, сливы в пол, трещины в стенах, плиты, соединения и т. д. (Lafavore, 1987) и может задерживаться в сравнительно небольшом объеме воздуха. Радон в доме имеет меньше воздуха для смешивания; следовательно,

концентрации в помещениях обычно выше, чем на улице. Закрытые дома с меньшими возможностями для разбавления радона имеют более высокую концентрацию этого газа, чем дома, в которых осуществляется проветривание.

10.7.1.2. Радоновый газ, здоровье человека и окружающая среда

Вызывает ли радон рак легких – горячая тема для обсуждения. В многочисленных публикациях обсуждались различные уровни опасностей, а именно воздействие на население низких уровней ионизирующей радиации (NRC, 1980). В 1988 году Национальный исследовательский совет (NRC) опубликовал информацию о вреде для здоровья радона и других внутренних альфа-излучателей (NRC, 1988; Cothorn и Rebers, 1990). На рисунке 10.11 представлена концентрация радона и риск развития рака легких в зависимости от скорости воздухообмена в жилых зданиях.

Радон – это природный радиоактивный газ, который был определен в исследованиях как газ, несущий высокий риск рака легких. Основываясь на опыте шахтеров, некоторые эксперты подсчитали, что естественный радон, накапливающийся в домах, может вызывать около 15 000 смертей от рака легких в год. В 1988 году Агентство по охране окружающей среды (EPA) опубликовало официальное заявление, в котором утверждалось, что радон является национальной проблемой, и разработало национальную программу, предусматривающую сокращение бытового радона.

В 1994 году «Журнал Национального института рака» представил результаты, сравнивающие воздействие радона на 538 некурящих женщин в штате Миссури, у которых был рак легких, с воздействием радона на 1183 пациента, у которых не было рака. «Связь между раком легких и воздействием радона в домашних условиях не была убедительно продемонстрирована», – заключили исследователи. «Величина риска рака легких в зависимости от концентрации радона, обычно фиксирующейся в жилищах США, кажется низкой».

Хотя исследователи в течение многих лет не могли доказать, что радон действительно несет риск рака легких, некоторые исследователи пришли к выводу, что существует опасность, хотя другие исследователи, такие как авторы статей в «Журнале Национального института рака», не показывают никаких доказательств риска. Независимо от того, оказывает ли радон непосредственное влияние на здоровье человека, он является частью проблемы загрязнения воздуха. Для контроля загрязнения воздуха необходимы знания экологической геотехнологии, поэтому соответствующие меры по устранению загрязнения будут более подробно обсуждаться в следующих разделах.

10.7.2. Инженерные свойства радонового газа

10.7.2.1. Общее обсуждение

Радоновый газ является одним из шести общеизвестных благородных газов, как показано на рисунке 10.1. Он имеет самый высокий атомный номер и атомный вес, но имеет самую низкую энергию ионизации по сравнению с другими благородными газами. Радон получают из радия (Ra), как показано в

таблице 10.3, в результате процесса распада альфа-типа; то есть, поскольку Ra-222 испускает α -частицу (He-4), удаляются два протона и два нейтрона. Следовательно, остаточное ядро имеет 86 протонов и 136 нейтронов (таблица 10.3).

Газ радон также может быть растворен в подземных водах. Дождь может поглощать радон, когда он падает через нижнюю тропосферу – область самой высокой концентрации радона в атмосфере. Когда загрязненные радоном осадки просачиваются в грунтовые воды, поверхностные воды могут загрязняться радоном.

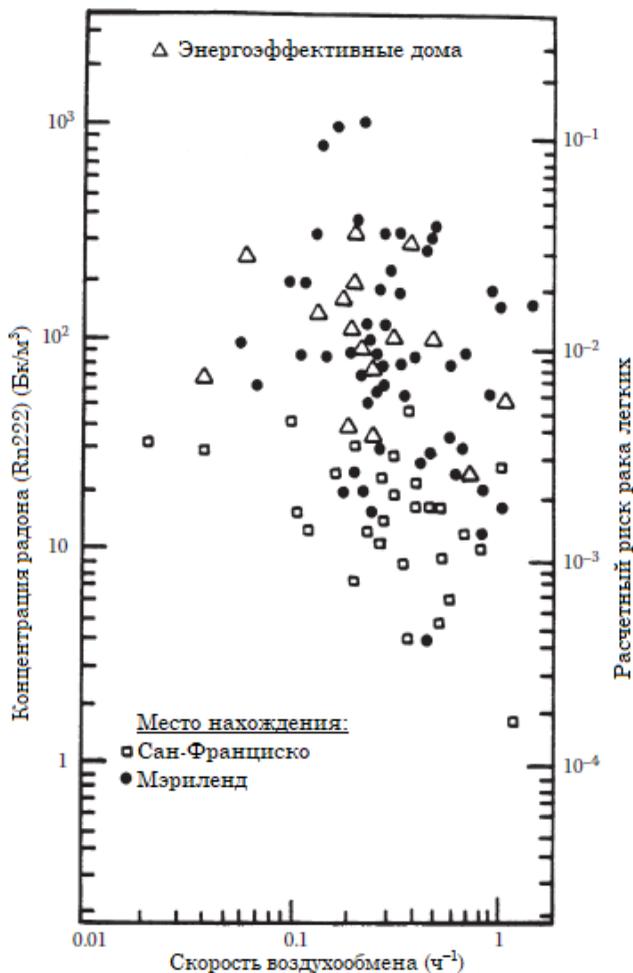


Рисунок 10.11. Концентрация радона и риск развития рака легких в зависимости от скорости изменения воздуха в жилых зданиях (по Nero, A. [1989], Phys. Today, v. 42, n. 4, pp. 32–39).

10.7.3. Радоновое излучение в горных породах или минералах

10.7.3.1. Общее обсуждение

Радоновый газ может широко распространяться в земной коре, но он сконцентрирован в определенных типах горных пород. Радон получается из урана и радия, как показано на рисунках 10.2 и 10.4, а эти элементы происходят из магматической породы (материнской породы), такой как гранит, базальт, габбро, диорит и т. д. В течение длительного периода времени, необходимого для превращения урана в радий и для превращения радия в радон, возможны многие процессы, такие как перенос и осаждение, гидравлическое воздействие, землетрясение и т. д., перемещение части урана или радия из одного места в другое. По мере того как радон перемещается из материнской породы во временные места в горной породе, эти временные места становятся вмещающими горными породами. Одной из общих особенностей этих вмещающих пород является то, что они обладают порами или полостями, например, известняк, доломит, конгломерат, брекчия, аргиллит и т. д. Самыми распространенными породами в восточной Пенсильвании, вмещающими радоновый газ, являются известняк и доломит

10.7.3.2. Подход Гилетти и Кульпа (1955)

Важны также и механизмы выделения газа радона из горных пород. В 1955 году Гилетти и Кулп предложили три возможных механизма, а именно: (1) метод с α -отдачей, (2) диффузию и (3) транспортировку. Краткое обсуждение каждого метода представлено ниже.

10.7.3.2.1. Метод α -отдачи

α -отдача получила свое название от процесса, посредством которого атом радона (Rn) отскакивает от распадающегося атома радия (Ra). При распаде радий ($Ra-226$) испускает альфа-частицу (α ; $He-4$) (уравнение 10.2) с образованием радона ($Rn-222$). Кинетическая энергия этой α -частицы достаточна для того, чтобы вновь образованный атом радона отбрасывался на некоторое расстояние в противоположном направлении. Это расстояние (l) известно как «длина отдачи α ». Было доказано, что это расстояние варьируется от 10^{-6} до 10^{-3} см в зависимости от среды, через которую происходит отдача (Andrews и Wood, 1972). О дальнейших разработках этого подхода пишут Fleischer и Mogro-Camero (1978) и Fleischer (1983).

10.7.3.2.2. Диффузионный процесс

Диффузионный процесс – еще один возможный путь высвобождения атома радона из породы. Поскольку частица мигрирует относительно неподвижной окружающей среды (твердой, воздушной или жидкой), с процессом отдачи (случай [a]), механизм диффузии также имеет характерные длины для движения радона, которые меняются в зависимости от среды, через которую диффузия происходит. Расстояние диффузии обозначается так:

- твердая среда – 10^{-9} см;
- жидкая среда – 2^{-9} см;
- газообразная среда (воздух) – 200^{-9} см

Дальнейшие обсуждения диффузионного поведения радона ($Rn-222$) даны в работах Andrews и Wood (1972) и Davis и соавторов (1987).

10.7.3.2.3. Транспортировка

Транспортировка – это движение частиц под действием движущейся окружающей среды (жидкости или воздуха). Из-за низкой первичной пористости и низкой проницаемости кристаллических пород воздух и вода не должны легко проходить через большую часть этих пород. Таким образом, транспортировка радона по воздуху или по воде через кристаллические породы не является механизмом, который должен обеспечивать существенный контроль над потерями радона (Davis и соавторы, 1987).

10.7.3.3. Метод α -отдачи (Fleischer и Mogro-Camero, 1978)

α -отдача получила свое название от процесса, посредством которого атом радона отскакивает от распадающегося родительского атома радия. При распаде радия испускает α -частицу (He) с образованием радона ($Rn-222$). Кинетическая энергия этой α -частицы достаточна для того, чтобы вновь образованный атом радона отодвинулся на некоторое расстояние в противоположном направлении, как показано на рисунке 10.12. Было доказано, что это расстояние, известное как длина α -отдачи, варьируется от 10^{-6} до 10^{-3} см, в зависимости от среды, через которую происходит отдача. Этот подход доработал Fleischer (1983).

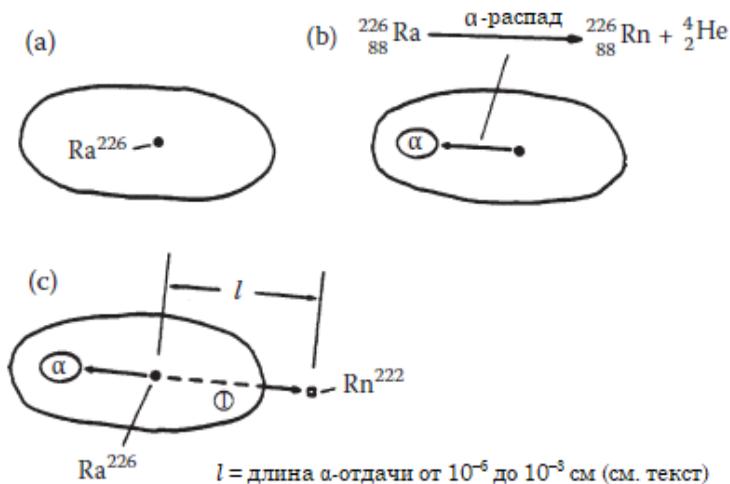


Рисунок 10.12. Схематические диаграммы, иллюстрирующие процесс α -распада и механизмы α -отдачи: (a) Ra , присутствующий в породе / минерале; (b) процесс распада; (c) длина α -отдачи.

10.7.3.4. Экологический подход α -отдачи (Fang, 1990)

Подход α -отдачи, как указано в случае 3, не учитывает нагрузку на окружающую среду во время процесса распада. Почему эти нагрузки важны, объясняется далее:

1) α -частица не перемещается далеко и является относительно слабой по сравнению с процессом бета- и гамма-распада;

2) длина α -отдачи зависит от структуры кристаллической решетки каждого минерала и энергий связи между частицами;

3) степень разложения или выветривания породы или минералов зависит от длины α -отдачи; сила, создаваемая только α -отдачей (рисунок 10.12), может быть недостаточной, чтобы вытолкнуть атом радона из минерала породы.

Силы, возникающие в процессе распада, включают тепло смачивания, кинетическую дисперсионную силу и электродвижущую силу (ЭДС) и обсуждаются в разделах 5.7 и 5.8. На эти силы влияют местные условия, такие как температура, поровые жидкости и давление. Схема модифицированного механизма, иллюстрирующая, как газ радона высвобождается из минералов породы, представлена на рисунке 10.13. На рисунке 10.13а показана длина α -отдачи, при которой минерал породы не разлагается, а на рисунке 10.13б показано, что если минерал породы разлагается, длина отдачи будет больше, как показано на рисунке 10.13б.

10.7.4. Механизмы взаимодействия радона с окружающей средой

Что касается механизма взаимодействия радона с окружающей средой, Fang (1990, 1991a) предложил следующие объяснения, основанные на теории поля энергии частицы. Далее даны краткие сведения.

10.7.4.1. Взаимодействие на основе молекулярной структуры радона

10.7.4.1.1. Низкая энергия ионизации

Как показано на рисунке 10.3, газ радон имеет самый высокий атомный номер и атомный вес, но самую низкую энергию ионизации среди благородных газов (Allinger и соавторы, 1976). Энергия ионизации – это энергия связи атома и минимальная энергия, необходимая для освобождения электрона от атома, или энергия связи ядра как энергия, необходимая для разделения ядра на свободные протоны и нейтроны (Marion, 1976). Другими словами, чем меньше энергия связи между частицами, тем легче взаимодействие частиц с окружающей средой.

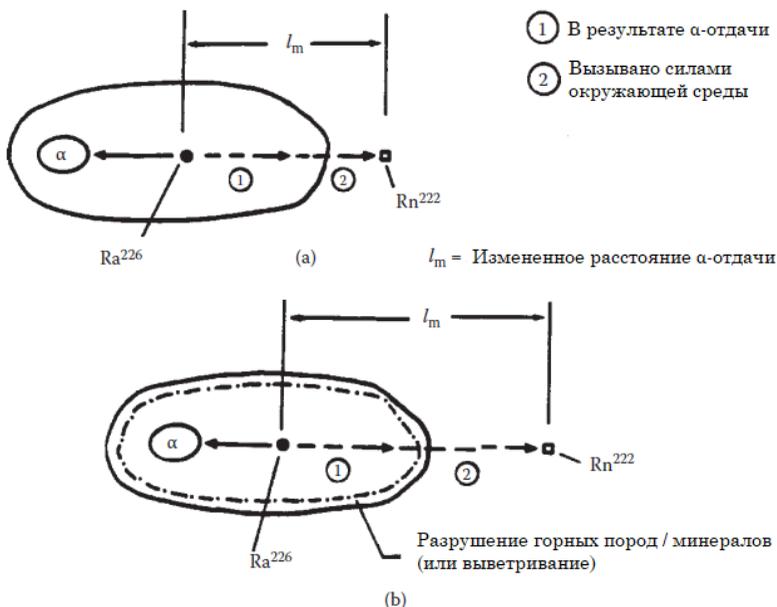


Рисунок 10.13. Подход с модифицированной отдачей: экологический механизм α -отдачи: (а) порода (или минерал) не разложилась, (б) порода (или минерал) разложилась (по Fang, H. Y. [1990], 83rd Annual Meeting and Exhibition, Air and Waste Management Association, Paper no. 90-153.10, Pittsburgh, PA, June 19).

10.7.4.1.2. Несбалансированная избыточная тепловая энергия

Поток энергии при изменении состояния вещества радонового газа показан на рисунке 10.4, который указывает на то, что родитель радона, радий (Ra), является твердым, когда сам радон ($Rn-222$) находится в газообразном состоянии, а дочери радона, полоний ($Po-218$) и свинец ($Pb-214$), также являются твердыми. Рассмотрим энергозатраты, необходимые для перехода из твердого состояния в газообразное, а затем энергию, выделяемую при превращении газа в твердое вещество. Поскольку период полураспада радонового газа составляет 3,825 дня (рисунок 10.1), в течение этого короткого периода времени состояние вещества в поле тепловой энергии создает временную несбалансированную избыточную тепловую энергию. Эта избыточная тепловая энергия вызовет и ускорит разделение частиц радона, поскольку сам радоновый газ имеет низкую энергию связи.

10.7.4.2. Прямое взаимодействие частиц радона с молекулами воды

Ионы H^+ и OH^- в воде сильно гидратированы, как отмечалось в главах 5 и 7. Теплота гидратации 1 моль иона H^+ при $25^\circ C$ составляет около 279 ккал. Это означает, что протоны (H^+) сильно связаны с молекулами H_2O и образуют ионы $(H_3O)^+$ и более крупные заряженные комплексы. Тем не менее протоны могут легко перемещаться по H -связям от одной молекулы воды или комплекса к другой. Кроме того, один протон может прыгнуть на заднюю сторону $(H_2O)_n$, а

другой прыгнет на другую сторону. Необходимо помнить, что радиус протона меньше одной десяти тысячной радиуса молекулы H_2O . Из-за этого небольшого размера протоны могут прыгать и реагировать очень быстро и могут попасть в узкие места, недоступные для других ионов или молекул. По оценкам, реакция нейтрализации ионов H^+ и OH^- для одного молярного раствора занимает всего около 10–11 с. Поскольку радон ($Rn-222$) содержит 86 протонов, для взаимодействия радона с молекулами воды может потребоваться меньше секунды.

10.7.4.3. Взаимодействие через пыль–суспензию

Fang (1990) предложил новый подход, предполагая, что пыль и взвесь (разделы 3.10 и 3.11) являются мостом между радоном и окружающей средой. Это предложение указывает на то, что:

- 1) радон взаимодействует с окружающей средой через распространенные типы среды, такие как пыль в воздухе и взвесь в воде или в почвенно-водных системах;
- 2) взаимодействие между радоном и пылевой суспензией происходит главным образом через физические типы адсорбционного действия (раздел 6.5).

Вышеуказанные механизмы взаимодействия могут объяснить, почему газ радон не является полностью инертным элементом и может взаимодействовать с окружающей средой. Кроме того, считается, что пыль и взвесь являются ключевыми факторами в решении проблем загрязнения системы воздух–вода–почва.

10.8. МЕТОДЫ МИНИМИЗАЦИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАДОНА НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

В настоящее время существует два основных способа управления этим нежелательным газом, которые представляют (1) пассивный подход и (2) активный подход к проблеме. В настоящее время пассивный подход рекомендован Агентством по охране окружающей среды США (EPA, 1986) и Департаментом природных ресурсов (DER, 1985b). Этот подход измеряет радон в атмосфере, а затем использует обычные методы строительства, чтобы либо не пропустить газ радона из дома, либо изгнать газ радона из дома. Оба подхода представлены следующим образом.

10.8.1. Минимизация воздействия радона пассивным способом

10.8.1.1. Американский метод EPA / DER

Для его обнаружения необходимо специальное оборудование. Двумя наиболее популярными в продаже радоновыми детекторами являются «Угольная канистра» и «Альфа-трек-детектор». Оба эти устройства подвергаются воздействию воздуха в доме, где обнаружен радон, в течение определенного периода времени и отправляются в лабораторию для анализа. Период испытаний для канистр с активированным углем составляет около 3–7 дней. Минимальный период испытаний для детекторов альфа-треков составляет 2–4 недели. Измерения, полученные на этих двух типах устройств, представлены в виде рабочих уровней (WL) или концентрации радонового газа в виде пикокюри на литр (пКю/л). Краткие обсуждения этих двух терминов представлены следующим образом.

10.8.1.1.1. Рабочие уровни (WL)

Рабочие уровни (Working Levels, WL) – измерения высвобождения энергии. Согласно EPA (1986), 1 WL – это количество радоновых дочерей, распад которых приведет к выделению 1,3 миллиарда вольт электронной энергии. Если преобразовать в тепло, это может повысить температуру стакана воды примерно на полградуса. Накопленное воздействие выражается в рабочих месяцах (WLM). Исходя из опыта уранодобытчика, 1 WLM составляет 170 ч, то есть количество времени, которое средний рабочий-шахтер проводит в шахте в течение месяца, подвергаясь воздействию 1 WL.

10.8.1.1.2. Пикокюри на литр (пКи/л)

Как обсуждалось в разделе 10.2.3, пикокри составляет 1 триллионную часть кюри. Одна пикокюри на литр воздуха – это около двух атомов радона в минуту, которые распадаются в каждой кварте воздуха в комнате. В таблице 10.9 представлена диаграмма оценки риска, который несет радон, предоставленная EPA (1986). В таблице 10.10 представлен допустимый уровень содержания радона, предложенный различными организациями. В США принятый уровень колеблется от 2 до 8 пКи/л.

10.8.1.2. Обсуждения: преимущества и недостатки

Нынешние общие меры по исправлению положения составляют так называемый пассивный подход. Пассивный подход пытается удержать радоновый газ вне дома. Этот подход имеет следующие преимущества и недостатки.

Таблица 10.9. Диаграмма оценки риска радона.

пКи/л	WL	В результате воздействия радона (из 1000)	Сопоставимые уровни воздействия	Сопоставимый риск
200	1	440–770	1000-кратный средний уровень облучения на улице	Более чем 60-кратный риск для некурящих, 4 умерших курильщика в день
100	0,5	270–630	100-кратный средний уровень облучения в помещении	20000 рентгеновских снимков грудной клетки в год
40	0,2	120–380		
20	0,1	60–210	100-кратный средний уровень облучения на улице	2 умерших курильщика в день
10	0,05	30–120	10-кратный средний уровень облучения в помещении	5-кратный риск для некурящих
4	0,02	13–50		
2	0,01	7–30	10-кратный средний уровень облучения на улице	200 рентгеновских снимков грудной клетки в год
1	0,005	3–13	Средний уровень облучения в помещении	Риск смерти от рака легких для некурящего
0,2	0,001	1–3	Средний уровень облучения на улице	20 рентгеновских снимков грудной клетки в год

Таблица 10.10. Уровни радонного газа, принятые различными организациями.

Организации / места	Принятый уровень (пКи/л)
Канада	
Организация, отвечающая за здравоохранение и социальную политику	10
Швеция	
Новое строительство	2
Здания, подвергающиеся ремонту	5
Существующие здания	11
США	
Американское общество инженеров по отопительному, холодильному оборудованию и кондиционированию воздуха (ASHRAE)	2
ЕРА	4
DOE	5
ЕРА во Флориде	6
Национальный совет по радиационной защите	8

Преимущество пассивного подхода утверждается Агентством по охране окружающей среды США и Министерством энергетики (DER). Недостатки перечислены ниже.

1. Нет гарантии, что радоновый газ перестанет просачиваться в дом. Радон просачивается туда, где есть воздух.

2. Это является дорогостоящим и тяжелым бременем для каждого владельца дома и вызывает много жалоб (в некоторых случаях владельцы обращаются в суд с судебным иском).

3. Не существует стандарта, описывающего то, как концентрация радона повлияет на здоровье человека.

4. Существующие методы касаются только жилых зданий. Не уделяется внимания радону в питьевой воде, накапливанию воды в душевых, туалетах, раковинах и стиральных машинах.

5. Влияние радона на растительность (деревья, травы и цветы), которая прямо или косвенно влияет на животных, молоко, фрукты и людей, также не учитывается.

10.8.2. Минимизация воздействия радона активным подходом

Минимизацию воздействия радона активным способом (обезвоживание) предложил Fang (1990, 1995b). Методы обезвоживания представляют собой простой, недорогой и удобный подход для управления схемами поверхностного дренажа для разбавления и/или перераспределения радонового газа в окружающей среде перед его проникновением в атмосферу или здания. Схематическая диаграмма потока, иллюстрирующая, как этот предложенный метод работает для проекта по снижению воздействия радона, представлена на рисунке 10.14.

Как правило, все системы подземного дренажа или обезвоживания могут использоваться для перераспределения и/или разбавления загрязненной радоном воды посредством перехвата воды в канавах или траншеях. Поскольку все дренажные и обезвоживающие системы являются частью обычных строительных процедур, все квалифицированные подрядчики должны знать, как эти процедуры функционируют; следовательно, никакие детали проектирования мы не даем. Однако все процедуры анализа и проектирования могут быть легко получены с

помощью процессов автоматизированного проектирования (CAD). Следует отметить, что системы дренажа и обезвоживания тесно связаны с подземными свойствами почв и горных пород, топографическими особенностями, уровнями грунтовых вод, местными климатическими условиями, местоположением зданий, типами фундаментов и т. д. Должно быть тщательное планирование и сотрудничество между разработчиком, подрядчиком и проектировщиком, что создать эффективные, экономичные системы.

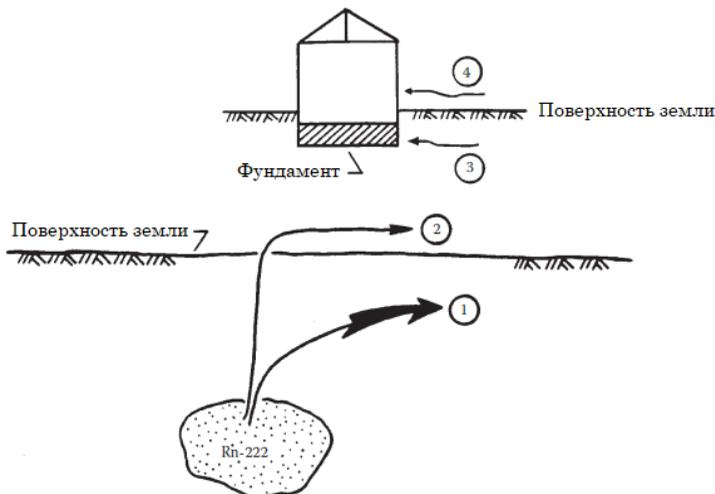


Рисунок 10.14. Системные подходы к разработке методик расчета по снижению выбросов радона. (1) Удалить большие порции радонного газа в подземных слоях почвы путем обезвоживания и/или изменения схемы подземного дренажа, направляя подземные воды (загрязненные радоном) в сторону от нужного участка. (2) Некоторое количество радонного газа, выходящего из грунта в воздух, может быть удалено посредством изменения схемы поверхностного дренажа путем направления поверхностных вод. Некоторое количество радонного газа в атмосфере будет смешиваться с пылью и всплывать в воздухе и присоединяться к естественному динамическому равновесию экосистемы. (3 и 4) Поскольку большие части радонного газа удаляются на этапах 1 и 2, оставшееся содержание радонного газа будет значительно снижено. Однако возможность, что некоторое количество радона попадет в здания, все еще остается. В таких случаях обычная уборка дома может быть весьма эффективна.

10.8.3. Методы мониторинга

10.8.3.1. Общее обсуждение

Системы мониторинга служат двум целям: (а) определить источники, в которых наблюдается утечка радонного газа, и (б) проверить, работает ли этот метод уменьшения радона. Существует много доступных приборов, измеряющих содержание в воздухе радона и продуктов его распада, с особым акцентом на измерениях внутри помещений. Различные типы устройств, используемых в настоящее время, обсуждались в ряде ссылок. Общий механизм предназначен для того, чтобы позволить радону диффундировать в него, а затем устройство регистрирует естественный распад захваченного радона на его дочерние элементы через дефекты или следы на специальных пластиковых пластинах внутри детектора. Как обсуждалось в предыдущем разделе, измерение содержания

радона в воздухе обычно приводит к широкому диапазону измеренных значений. Тем не менее прибор скажет нам, есть ли в помещении радон.

10.8.3.2. Коммерчески доступные методы (одобренные EPA-методы)

Несколько методов используются для измерения концентрации радона и дочерних элементов. Одним из методов является метод Кузнецца, который был разработан для использования в шахтах. Проба воздуха отбирается через фильтр, который собирает частицы воздуха с дочерними элементами радона. В настоящее время метод Кузнецца часто используется для проверки домов, чтобы определить, является ли радоновый газ серьезной проблемой, требующей дальнейшего отбора проб (DER, 1985a).

Другим методом измерения концентрации дочерних элементов является блок отбора проб радонового потомства (RPISU). RPISU прокачивает воздух через небольшой фильтр, который удаляет частицы воздуха с радоном, прикрепленным к радиационному чипу, который позже считывается специальным устройством для определения поглощенного излучения. Поглощенное излучение выражается как концентрация дочерних элементов при калибровке. Во всех измерениях лучшая информация получается при длинных периодах выборки, от нескольких месяцев до года, чтобы учесть сезонные колебания.

10.8.3.3. Измерения радона в приповерхностном слое почвы

Измерения радона в приповерхностном слое почвы обсуждались в разделе 10.6. Существует несколько моделей оборудования, таких как EDA Model 200 и Pylon Model NR-1025, для установления подземного содержания радона, как сообщают Rose и соавторы (1988). Измерения содержания радона в подземных водах представил Graves (1987), а в почве, воде и горных породах – Gundersen и Wauty (1992).

10.8.3.4. Фотохимический метод

Еще одно измерение радона *in situ* в приповерхностных слоях почвы представили Fang и соавторы (1987). Метод основан на принципах фотохимии. Этот метод может измерять газ радон в приповерхностном слое почвы или в воздухе. Устройство выполнено из чувствительной фотопленки. Пленка может уловить след отраженного на ней радиоактивного газа. Устройство доступно в различных размерах и может быть установлено на разных глубинах в приповерхностных слоях почвы. Количество радиоактивного газа можно определить под микроскопом в лаборатории, как показано на рисунке 10.15. На рисунке 10.15a показано состояние *in situ*, а на рисунке 10.15b – оценка лабораторного микроскопа по чувствительной фотопленке.

На рисунке 10.16 показан метод определения местоположения радонового газа методом трассировки. На рисунке 10.16 точка *A* иллюстрирует путь для газа радона вдоль неотектонического разлома, тогда как точка *B* указывает пик кривой α -следа. Следует отметить, что искомая информация представляет собой относительное количество газа радона, а не абсолютное количество. Методы, описанные на рисунках 10.15 и 10.16, имеют низкую стоимость и просты для использования. Они служат для определения того, нужно ли далее применять метод, описанный в разделе 10.8.3, для уменьшения содержания радона, даже если мы не знаем абсолютного содержания этого газа в данном месте.

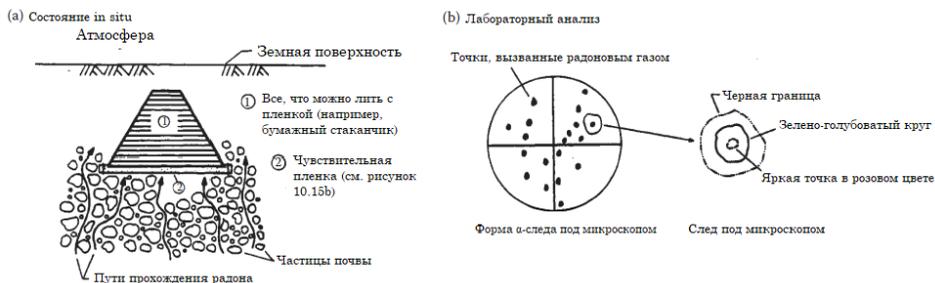


Рисунок 10.15. Подземный радоновый газомер: (a) установка *in situ*; (b) лабораторный микроскоп оценки (по Fang, H. Y., Luo, G. Y., and Chu, T. G. [1987], Proc. 1st Int. Symp. on Environmental Geotechnology, v. 2, pp. 219–231. Reprinted with permission of ENVO Publishing, Bethlehem, PA).

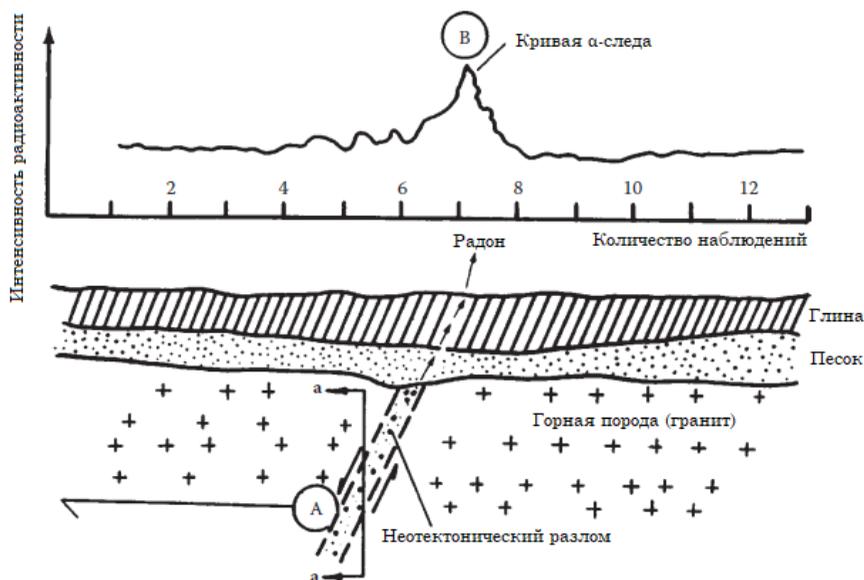


Рисунок 10.16. Метод определения местоположения радонового газа – следовой метод.

Как показано на рисунке 10.14, большая часть радонового газа, имеющегося в приповерхностном слое почвы, может быть удалена путем изменения схем подземного дренажа и обезвоживания. Всегда есть немного радонового газа, выходящего из почвы в атмосферу. В таком случае газ удаляется путем изменения схемы поверхностного водоотведения или откачивания загрязненных радоном подземных вод. Другое предложение касается обычного проветривания дома. В сырых и грязных подвалах будет больше радиоактивной пыли, чем в сухих и чистых помещениях. Строительные процессы вносят большее количество радона в атмосферу. Чем меньше нарушается естественная среда, тем меньше

содержание радона в воздухе. Если строительные работы необходимы, то нужно их тщательное планирование.

10.9. УТИЛИЗАЦИЯ ЯДЕРНЫХ ОТХОДОВ

10.9.1. Проблемный обзор

Как пишет Rahn (1986), высокоактивные ядерные отходы, образующиеся при переработке отработавшего реакторного топлива, являются источником высокой радиоактивности. Высокорадиоактивные компоненты в отходах могут быть источниками загрязнения подземных вод. Подземные воды были загрязнены на некоторых объектах федерального правительства. Например, в Хэнфорде, штат Вашингтон, радиоактивные жидкие отходы высокого уровня содержания хранятся примерно в 150 подземных резервуарах, перекрывающих базальт и гравий. В 1986 году в Хэнфорде было зарегистрировано 20 утечек. Самая серьезная произошла в апреле 1973 года, когда 450 м^3 высокоактивных отходов впиталось в землю (Farney, 1974). Это включало 14000 Ки стронция (Sr-90) и 40000 Ки цезия (Cs-137). Около $500\,000 \text{ м}^3$ низкоактивных отходов в Хэнфорде также были намеренно выброшены в грунт с помощью траншей. Правительственные гидрогеологи установили большую систему наблюдательных скважин для изучения движения загрязненных подземных вод; рутений (Ru-106) и Н-3 были наиболее подвижными элементами (Graham, 1981). В Национальной инженерной лаборатории штата Айдахо (INEL) Национальная станция испытания реакторов сообщила, что большие объемы радиоактивной воды были закачаны в подпиточную скважину. С 1952 года радиоактивные отходы сбрасываются в водоносный горизонт реки Снейк, который состоит из прослойки базальта и гравия. Мониторинг водоносного горизонта показывает, что тритий (самый тяжелый изотоп водорода) прошел не менее 12 км от скважины, а плутоний (Pu-239) – не менее 2,5 км. Как Sr-90 , так и Cs-137 , по-видимому, адсорбируются и остаются привязанными к скелету водоносного горизонта в пределах примерно 2 км от нагнетательной скважины (NRC, 1984). Тритий, 66 Ки Sr-90 , 120 Ки Cs-137 , 120 Ки Co-60 (кобальт) и другие отходы также сбрасываются в ямы с 1954 года. Большая часть растворенных Cs-137 и Sr-90 были адсорбированы слоями осадка и базальта между в и уровнем грунтовых вод, который находится на 137 м ниже поверхности земли.

Основная проблема, с которой сталкивается атомная промышленность, – это утилизация сборок отработавшего топлива. Общее количество отработавшего топлива, которое хранилось на электростанциях в конце 1980 года, составляло около 27000 сборок весом 7000 тонн, имеющих объем куба длиной 15 м и испускающих 2 миллиарда кюри радиоактивности. Сборки отработавшего топлива содержат искусственные (трансурановые) элементы. За последние годы было синтезировано не менее 14 трансурановых элементов с атомными номерами, превышающими уран (от 93 до 106). Большая часть этой работы была проделана группой из Калифорнийского университета в Беркли. Для дальнейшего обсуждения этого аспекта см. стандартные учебники по ядерной физике.

10.9.2. Источники и виды ядерных отходов

10.9.2.1. Основные источники ядерных отходов

Существует четыре основных источника, где могут образовываться ядерные отходы, а именно:

- 1) хвосты переработки (обогащения) из урановых (U) рудников с порошкообразными породами, содержащими большое количество радия (Ra) и радона (Rn);
- 2) сборки топливных стержней, хранящихся под водой вблизи ядерных реакторов;
- 3) ядерные отходы от коммерческого использования, такие как отходы от больниц и частных исследовательских лабораторий;
- 4) ядерные отходы от изготовления ядерного оружия.

10.9.2.2. Радиоактивные отходы высокой активности (HLRW)

Высокоактивные отходы, образующиеся при переработке отработанного реакторного топлива, содержат тысячи кюри на кубический метр. Отработавшее топливо является еще одним источником высокой радиоактивности, как и трансурановые элементы. Эти высокорadioактивные компоненты в отходах могут быть источниками загрязнения подземных вод.

Как обсуждалось в предыдущих разделах, имеются признаки того, что ядерное излучение высокого уровня происходит из отходов отработанного топлива. Переработанные отходы включают около 4×10^5 м³ высокорadioактивных растворов, содержащих U-235, Pu-239, Sr-90, Ce-137 (церий) и другие радионуклиды. Большая часть высокоактивных и трансурановых отходов хранится на объектах Министерства энергетики США в резервации Хэнфорд, штат Вашингтон, в Национальной инженерной лаборатории штата Айдахо и на заводе в Саванне, штат Джорджия.

10.9.2.3. Низкоактивные радиоактивные отходы (LLRW)

LLRW очень слабо определены. В целом, LLRW поступает из коммерческого использования из больниц и частных исследовательских лабораторий. Большая часть LLRW имеет низкую радиоактивность около 35 Ки/м³. Однако некоторые LLRW очень радиоактивны и могут содержать относительно большие количества продуктов деления с периодом полураспада более 25 лет (Rahn, 1986). Типичный пример показывает, что 1 г урана (U-238) имеет радиоактивность всего 3×10^{-6} Ки, а стронций (Sr-90) имеет радиоактивность 140 Ки/г и период полураспада всего 28,1 года.

10.9.3. Управление ядерными отходами

Для удаления или обращения с ядерными отходами необходимо учитывать следующие четыре основных момента.

1. *Хранение.* Снизить интенсивность радиоактивности путем хранения отходов в безопасном месте, поскольку радиоактивность уменьшается в 10–100 раз в 50 лет.

2. *Затвердевание.* Разработать метод преобразования ядерных отходов в твердую форму с целью уменьшения подвижности и диспергируемости; в таблице 10.11 приведены методы отверждения ядерных отходов (Roy, 1980).

3. *Изоляция.* Изоляция отходов жизнедеятельности человека путем хранения их в изолированных местах, таких как отложения глубокого морского дна, дно шахтных стволов, отдаленные и глубокие места в пустынях или на Луне.

4. *Установка.* Безопасная транспортировка и введение в хранилище. Чтобы создать эффективную систему обращения с радиоактивными отходами, необходимо оценить три основных критерия, на что указывают McCarthy (1975), White (1980) и Chaney и соавторы (1986).

1. Форма отходов сама по себе должна быть инертной и нерастворимой в среде хранилища.

2. Материал контейнера и внешней упаковки должен ограничивать любые радионуклиды, которые выщелачиваются из первичных отходов.

3. Горная порода должна быть непроницаемой.

Взаимодействие между ядерными отходами и окружающими породами обсуждалось McCarthy (1978) и White (1980). Основным интерес к взаимодействию горных пород с ядерными отходами состоит в попытке определить, какой тип горной породы будет взаимодействовать меньше или быть менее чувствительным к отходам и оставаться в непроницаемом состоянии. Результаты исследований в настоящее время указывают на предпочтение породы силикатного типа.

Таблица 10.11. Затвердевание ядерных отходов

	Существующие твердые тела	Общий запас радионуклидов в твердых веществах производства ^a (МКи)	Состояние инженерного развития	Данных о свойствах процесса и т. д.
Только горячее отверждение	Кристаллические = (керамические) радиофазы	100	Успешная, полностью сконструированная система (Hanford)	Небольшое количество
	Криптокристаллические радиофазы (кальцины)	100	Успешная непрерывная работа в течение более 8 лет (Айдахо)	Немного
	Стекланные (+ кристаллические) радиофазы	30 ^b	Горячие испытания проводятся в Великобритании и США; горячий завод во Франции	Очень большое количество
	Металлические матричные композиты	1	Горячий пилотный завод в Бельгии	Умеренное количество
Окончательное удаление завершено	Цементные композиты	1	Полностью действующий объект в США (Ок-Ридж)	Немного
	Природные минеральные матричные композиты, образованные на месте и закачанные в пористый песчаник	100	Горячая полномасштабная утилизация в США	Множество

^a В порядке возрастания.

^b В том числе 24 мКи во Франции

Источник: по Roy, B. (1980), *Earth Mineral Sci.*, v. 50, n. 2, Nov.–Dec., p. 13.

10.9.4. Места утилизации и методы утилизации

10.9.4.1. Общее обсуждение

Федеральный закон о политике в отношении ядерных отходов 1982 года и Министерство энергетики (1983 года) дают общие руководящие указания в отношении местоположения подземного участка, который будет служить первым в стране постоянным хранилищем высокоактивных ядерных отходов. Постоянное хранилище высокоактивных радиоактивных отходов будет находиться в геологических хранилищах, специально предназначенных для этой цели. Основными проблемами, связанными с длительным ограничением радиоактивных отходов высокого уровня активности, являются угроза проникновения человека и возможность транспортировки химических веществ в растворе в результате миграции подземных вод (Davis, 1984; TRB, 1986).

10.9.4.2. Места утилизации

В 1985 году тремя ведущими кандидатами на места, выбранными Министерством энергетики (DOE) для свалок HLRW, являются: округ Глухой Смит в штате Техас; Горы Юкка, примерно в 160 км к северо-западу от Лас-Вегаса, Невада; Hanford Works федерального правительства возле Ричленда, штат Вашингтон. До 1962 года все LLRW были размещены на шести федеральных объектах (NRC, 1984). После 1962 года было открыто шесть коммерческих объектов, а именно: Maxey Flats, KY; Шеффид, Иллинойс; Западная долина, Невада; Бити, Нью-Йорк; Ричленд, Вашингтон; и Barnwell, SC. Они обрабатывают большую часть производимых в стране LLRW, которые составляют около 75 000 м³/год. Федеральное правительство закапывает примерно одинаковый объем LLRW от исследовательской и оборонной деятельности на пяти основных объектах Министерства энергетики США и нескольких небольших объектах. Три штата, которые принимают коммерческие LLRW, все более неохотно продолжают оставаться единственными в стране хранилищами ядерных отходов. В 1980 году Конгресс США принял Закон об утилизации отходов низкого уровня, который обязывал отдельные штаты создавать свои собственные места или присоединяться к договорам между штатами на региональной основе к 1986 году.

10.9.4.3. Хранение радиоактивных отходов

Как указано в разделе 10.3.3, хранение радиоактивных отходов является одной из основных задач в настоящее время. Она включает в себя следующие этапы: временное хранение в виде жидкости; преобразование в твердое тело; временное хранение в твердом виде; транспортировка и хранение или утилизация в федеральном наземном или подземном хранилище. Хранение или утилизация должны предотвращать контакт нуклидов с атмосферой, биосферой или гидросферой на срок от 1000 до нескольких сотен тысяч лет. Были предложены многочисленные способы хранения или утилизации HLRW. Виноград (1974)

предложил, чтобы хранилище радиоактивных отходов находилось в засушливой зоне.

10.9.4.4. Форма отходов и пути утечки

Большинство радиоактивных отходов находится в жидкой форме. Вода из основных протекающих потоков просачивается в траншеи. Траншеи обычно имеют ширину 15 м, глубину 10 м и длину до 200 м. После размещения контейнеров для отходов на отходы помещается около 2 м глиняной шапки. Уплотнение, прогноз оседания и другие геотехнические аспекты тесно связаны с аналогичными процедурами анализа и проектирования глиняного вкладыша на полигоне.

Жидкая форма отходов называется фильтратом, который может мигрировать в подземный водоносный горизонт. Как писал Robertson (1984): «В течение периода, когда были выбраны шесть коммерческих площадок для захоронения, не было единых правил, предусматривающих комплексные геогидрологические критерии для конкретных участков, которые должны применяться для выбора и эксплуатации площадок для захоронения. Комиссия по атомной энергии разработала некоторые общие руководящие принципы и стандарты производительности для площадок низкого уровня, но позволила штатам устанавливать свои собственные стандарты, если они брали на себя ответственность за участки регулирования».

10.9.4.5. Комментарии к существующим отходам

Далее даны некоторые комментарии о местах захоронения отходов, сделанные Rahn (1986) и другими учеными.

1. Западная долина, штат Нью-Йорк, подстилается валунной глиной ледникового периода. Породы ледникового периода – это несортированный материал, или смесь фрагментов породы и тонких материалов, оставшихся в результате таяния ледников. Вода проникает в траншеи, вызывая «эффект ванны», при котором вода просачивается на землю.

2. Площадка Maxey Flats, штат Кентукки, представляет собой сланец, имеющий низкую проницаемость, но содержащий многочисленные трещины, которые контролируют поток подземных вод. Плутоний и другие изотопы мигрировали в боковом направлении через тонкий трещиноватый слой песчаника.

3. Площадка в Шеффилде, штат Иллинойс, по-видимому, предназначалась для глинистой ледниковой залежи, но позже было обнаружено, что это место содержит слои гравийного песка с высокой проницаемостью. Третий был обнаружен в некоторых контрольных скважинах, окружающих участок. Третий движется со скоростью около 8 м/год через ледниковые наносы. Наносы – это многослойное накопление водоразделенного материала, который уложен потоками талой воды, поступающей с поверхности ледникового льда.

4. Участок Барнвелл, Южная Каролина, был размещен в прибрежно-равнинных отложениях, состоящих из песчаной глины, которая несколько более проницаема, чем пахота или сланец других участков. Геологическая служба США

сообщила, что третий мигрирует вертикально и латерально через проницаемые слои песка и, как считается, движется со скоростью 27 м/год.

5. Битти, штат Невада, и Ричленд, штат Вашингтон, расположены в засушливых регионах и не испытывают проблем с участками в более влажных регионах. Среднегодовое количество осадков на обоих участках составляет 10,1 и 16,5 см соответственно. Оба участка раскопаны в смешанных крупнозернистых неконсолидированных отложениях.

Взаимодействие ядерных отходов с подземными водами и другими связанными инженерно-геологическими свойствами представлены в работах Rahn (1986), McCready (1986) и в разделе 10.8. Наводнение было проблемой на всех этих местностях. Защита отходов также важна.

10.10. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

10.10.1. Общее обсуждение

Разработка ядерных взрывчатых веществ сделала новый недорогой энергосберегающий источник энергии высокой мощности. В конце 1940-х годов в США были продемонстрированы обычные взрывчатые вещества большой мощности, полезные для земляных работ, добычи полезных ископаемых и строительства плотин. В 1957 году Инженерный корпус армии США и Радиационная лаборатория им. Лоуренса (Ливермор, Калифорния) разработали программу исследования возможных промышленных применений ядерных взрывчатых веществ. Их исследования включали в себя раскопки дорожных вырубок, совокупную добычу открытым способом, отвод дренажа или перехват с помощью кратеров и удаление оползней, а также их вызывание в целях стабилизации ситуации. Некоторые из обнародованных результатов будут обсуждаться в следующем разделе.

10.10.2. Результаты исследований и решения безопасности

10.10.2.1. Результаты исследований

Результаты исследований включают: (1) влияние на кратерные размеры расстояния между зарядами; (2) влияние расстояния на неровности или излом в кратере; (3) форма края относительно края, полученного с точечными зарядами, на обеих сторонах и концах кратера. Исследования, проведенные в Радиационной лаборатории им. Лоуренса (Ливермор, Калифорния) и Инженерного корпуса армии США, пришли к следующим выводам, как пишут Nordyke и Circeo (1966).

1. Использование промежутка, равного приблизительно одному радиусу кратера, приводит к получению кратера с гладкой стороной с кажущимися размерами примерно на 10–20 % больше, чем ожидалось, на основе данных одного заряда.

2. Использование промежутка, равного примерно 1,25 радиуса одного кратера, приводит к образованию выемки с размерами, приблизительно равными тем, которые ожидаются от отдельных зарядов.

3. Использование расстояния в 1,5 раза больше радиуса одного кратера приводит к образованию кратера, который несколько меньше радиуса одного кратера и имеет довольно неравномерное поперечное сечение.

10.10.2.2. Соотношение пользы и затрат и решения безопасности

Затраты на ядерные раскопки в скальных породах, по разным оценкам, конкурентоспособны по сравнению с обычными раскопками в диапазоне 10 узлов, быстро снижаясь до нескольких центов на кубический ярд в диапазоне мегатонн.

Ожидается, что прогресс в разработке термоядерных взрывчатых веществ с низким делением приведет к снижению уровня радиоактивности на 100 градусов ниже уровня седана 1962 года.

Соображения безопасности чрезвычайно важны. Любое использование ядерных взрывчатых веществ потребует тщательного внимания к проблемам безопасности. Комиссия по атомной энергии и Лаборатория радиации им. Лоуренса представили некоторые руководящие принципы, как показано в таблице 10.12.

10.11. ДРУГИЕ ПРИМЕНЕНИЯ

В последние годы возникла потребность в быстром и точном методе определения свойств материалов, таких как удельный вес и влажность материалов, используемых при строительстве дорожного покрытия и его компонентов. Использование ядерных устройств для неразрушающих испытаний и калибровка устройств имеет решающее значение. Наилучшая калибровочная кривая для определения удельного веса получается из полевых данных.

Лабораторная калибровочная кривая, основанная на всех протестированных материалах, дает наилучшие результаты для определения влажности. Основными преимуществами использования ядерных устройств являются экономия времени, поскольку испытания ядерной плотности являются неразрушающим методом испытаний (NDT); максимальные плотности в лаборатории не могут быть скорректированы для грубых частиц в соответствии со стандартами ASTM. ASTM предлагает две общие процедуры.

1. Измерения плотности и влажности почвы. Многие исследователи сообщают об использовании ядерных измерений свойств почвы (HRB, 1966). ASTM предоставляет стандартную методику испытаний (ASTM D3017-88 [1993]) для измерения содержания влаги и плотности в почвах и других дорожных материалах.

2. Содержание асфальта в дорожной смеси: используйте источники гамма-энергии для измерения растрескивания дорожного покрытия, содержания влаги и плотности различных типов строительных материалов и земляных конструкций (Fwa и Tan, 1992).

Таблица 10.12. Пределы структурного повреждения зданий и оборудования вблизи подземных ядерных взрывов

Тип структуры	Тип повреждения	Пиковый порог скорости поверхности, большой урон (см / с)	Соответствующее масштабное расстояние в граните ¹ (Ft/Kt ^{1/3})
Жилой (старый) дом	Растрескивание штукатурки	10	2500
Жилой, панельный дом	Растрескивание	20	1250
Буровая скважина	Вертикальное смещение, горизонтальное смещение	40–50	750–550
Оборудование (насосы, компрессоры, генераторы и т. д.)	Полозья согнуты, валы смещены	100	375
Сборные металлические конструкции на бетонных площадках	Трещины на площадках, деформированная сталь	150	250
Жесткие стальные резервуары, от 50 галлонов до нескольких тысяч галлонов	Коробление	≥300	125
Вспомогательные столбы	Падение	≥300	125

¹ Расстояния указаны для конструкций, находящихся непосредственно на твердой кристаллической породе, такой как гранит, с взрывом, произведенным в той же среде; коэффициент безопасности не включен. Поэтому результаты минимальны и применимы только к этому идеальному случаю. Для большинства промышленных применений расстояния, вероятно, будут существенно увеличены (вдвое или более), чтобы обеспечить коэффициент безопасности и принять во внимание возможное присутствие различных и менее благоприятных геологических условий.

Источник: по Cauthen (1964); цит. по: Hansen, S. M. and Toman, J. (1966), *Aggregate Production with Nuclear Explosives*, HRR no. 107, pp. 37–53. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в свободном доступе и не подлежит защите авторских прав.

10.12. РЕЗЮМЕ

1. Обсуждаются радиационные аспекты окружающей среды в геотехнологии, включая ядерные отходы, газ радон, ядерную энергию для строительства и использование ядерной энергии в качестве неразрушающих методов испытаний.

2. Рассматривается материал базовой ядерной физики, включая структуру ядра, ядерную физику и химию, ядерные реакции, радиоактивность и процесс радиоактивного распада.

3. Обсуждается природа семейства благородных газов и радиоактивного и токсичного радонового газа, включая происхождение, распределение и

технические характеристики. Рассматривается механизм выделения радонового газа из горных пород и минералов. Предложен относительно недорогой метод уменьшения количества радона. Этот метод будет работать для защиты жилых домов, а также минимизировать другие последствия для защиты окружающей среды.

4. Обсуждаются методы захоронения ядерных отходов, включая источники и виды ядерных отходов. Управление ядерными отходами и процедурами также рассматривается.

5. Обсуждаются использование ядерной энергии для строительства, соотношение выгод и затрат и соображения безопасности. Также рассматривается использование ядерной энергии в качестве неразрушающего (NDT) испытания, используемого при строительстве шоссе.

ПРОБЛЕМАТИКА

10.1. Определите следующие термины: нуклеиновые кислоты, тритий, трансурановые элементы.

10.2. Какие части его структуры несут основную ответственность за массу атома и за его химическое поведение?

10.3. Что происходит с массовым числом (A) и атомным номером (Z) ядра, испускающего гамма-фотон? Что происходит с его массой?

10.4. Обсудите причины и контроль загрязнения подземных вод радиоактивными отходами.

10.5. Обсудите характеристики ядерных отходов высокого уровня и низкого уровня.

10.6. Радий (Ra) самопроизвольно распадается на элементы гелий (He) и радон (Rn). Почему сам радий считается элементом, а не просто химическим соединением гелия и радона?

10.7. Почему радоновый газ относится к семейству благородных газов? Определите радона продукты радона.

10.8. Обсудите соотношение выгод и затрат от использования ядерной энергии для строительства.

10.9. Каковы причины использования гамма-излучения в качестве неразрушающего (NDT) испытания для определения свойств материала?

11. Сжимаемость почв и их поведение с учетом таких параметров, как напряжение, деформация, время

11.1. Введение

Для анализа и проектирования фундаментных конструкций необходимо изучить два важных параметра грунта: сжимаемость и напряженно-деформационное поведение почвы. Изменения сжимаемости или объема включают усадку, набухание и уплотнение. Характеристики системы напряжение–деформация–время включают прочность почвы, критерии ее разрушения и ползучесть. Усадка и набухание обсуждались в разделах 6.2 и 6.3. Другие параметры обсуждаются в данной главе.

11.2. УПЛОТНЕНИЕ ПОЧВ (ДЕНСИФИКАЦИЯ)

11.2.1. Общее обсуждение

Уплотнение – это простой и недорогой механический процесс укрепления грунта, который является основной частью геотехнологии. Основная цель этого процесса – уменьшить размер пустот грунта с помощью механических устройств, чтобы уменьшить усадку, гидравлическую проводимость и увеличить сопротивление сдвигу или несущую способность почвы.

Простейший способ проиллюстрировать этот процесс – это дать соотношение единицы веса (плотности) к содержанию влаги в почве, полученные в результате тестов на уплотнение (Proctor, 1933). Процедуры испытания на уплотнение были стандартизированы как Американским обществом испытаний и материалов (ASTM), так и Американской ассоциацией государственных автомобильных дорог и транспортных средств (AASHTO). Существует два основных типа процедур испытания на уплотнение, используемых при конструировании: стандарт (ASTM D698; AASHTO T99) и модифицированные процедуры (ASTM D1557; AASHTO T180). Основное различие между этими двумя методами состоит в том, что модифицированные процедуры дают более высокие усилия по компоновке, чем стандартная процедура. Компактное усилие основано на количестве работы, затраченной на единицу объема при уплотнении почвы. Типичное соотношение для илистой глины показано на рисунке 11.1.

Как показано на рисунке 11.1, вес сухой единицы может быть вычислен из массы влажной единицы и соответствующего содержания влаги. Точка e , показанная на кривой, называется максимальной сухой единицей веса (γ_0), а соответствующее содержание влаги называется оптимальным содержанием влаги (ОМС). Содержание влаги ниже ОМС называется сухой стороной, а содержание над ОМС – влажной стороной. Кривая с правой стороны фигуры называется

кривой нулевой воздушной пустоты и определяется как масса твердых частиц на единицу объема насыщенности массы почвы.

Как сообщили Shook и Fang (1961), в зависимости от типа почвы указаны несколько типов кривых для отношения удельный вес – влажность. Для обычной почвы, такой как почва А-6, используемой для земляных плотин и насыпей шоссе, кривая с одной вершиной показана на рисунке 11.2 (2). Если тестируется гранулированный материал, такой как щебень, который обычно используется в качестве основного материала при строительстве автомагистралей, получается двойной пик или пик 11/2, как показано на рис. 11.2 (1), и если содержится тяжелая глина, то кривая будет странной формы, такой как на рисунке 11.2 (3).

11.2.2. Теории уплотнения

Чтобы понять механизм процесса уплотнения почвы, необходимо изучить различные теории и концепции уплотнения. Было предложено несколько теорий и концепций для объяснения процесса уплотнения почвы и соотношения веса и единицы влажности. Краткие обсуждения некоторых теорий и концепций представлены далее.

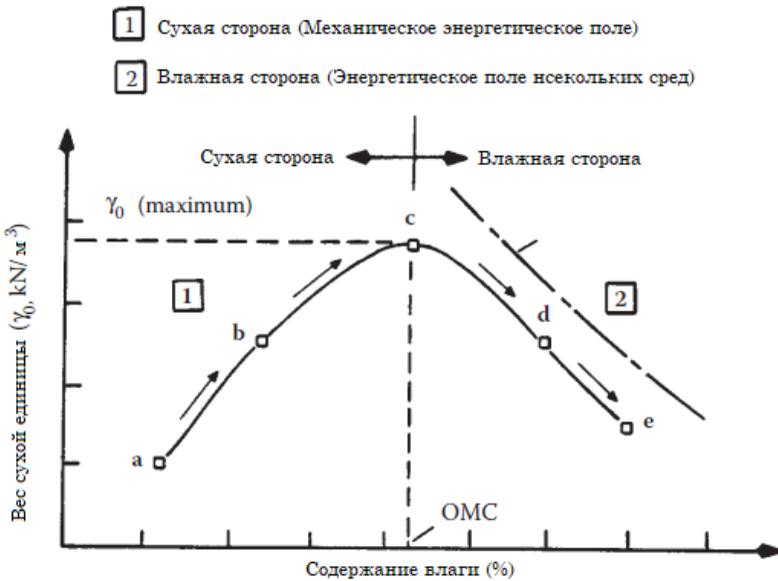


Рисунок 11.1. Вес единицы в зависимости от содержания влаги в илстой глине.

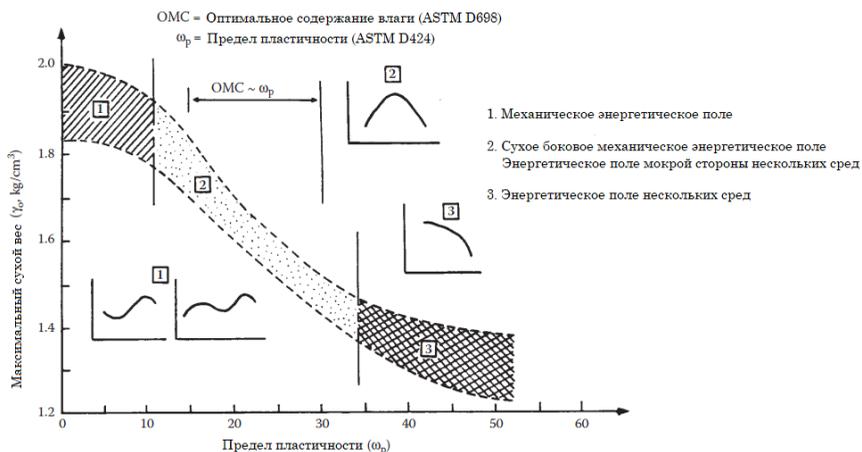


Рисунок 11.2. Максимальный сухой вес в зависимости от типа почвы как отражения предела пластичности.

11.2.2.1. Теория Проктора (1933)

Проктор предполагает, что почвенная масса состоит из гравия, песка, ила и глины, а уплотнение является актом выталкивания мелких зерен в пустоты между более крупными зернами. Предполагается, что вода покрывает поверхность зерен почвы и служит смазкой, которая уменьшает сопротивление трения между частицами почвы и позволяет усилию уплотнения стать более эффективным при размещении тонкого материала в пустотах между более крупными частицами. Если содержание влаги недостаточно для обеспечения необходимой смазки, удельный вес уплотненного грунта будет относительно низким, поскольку силы уплотнения недостаточно, чтобы преодолеть сопротивление трения между зернами почвы.

11.2.2.2. Теория Гогентолера (1937а)

Хогентолер предположил, что почвы подвергаются стадиям смачивания во время процесса уплотнения; когда содержание влаги выражается в процентах от объединенных объемов твердых веществ почвы и влаги, отношение влажности к единице веса становится серией прямых линий с разными уклонами. Предложены четыре стадии: гидратация (отрезок a-b на рисунке 11.1), смазка (отрезок b-c), набухание (отрезок c-d) и насыщение (отрезок d-e).

11.2.2.3. Теория Ламбе (1958)

Ламбе использовал физико-химическую концепцию, чтобы объяснить взаимосвязь веса и содержания воды в почве. Низкий удельный вес, как показано в точке **a** на рисунке 11.1, обусловлен недостаточным количеством воды для диффузного двойного слоя, что обеспечивает более высокую концентрацию электролитов и уменьшает отталкивание между частицами, вызывая тенденцию к флокуляции коллоидов. Флокуляционные структуры предполагают низкую степень ориентации частиц и низкий удельный вес. Происходит увеличение содержания влаги от **a** до **b**, и двойной слой расширяется, а концентрация

электролита уменьшается и позволяет более упорядоченное расположение частиц, что дает более высокую единицу веса. Дальнейшее увеличение содержания воды от **b** до **c** вызывает дальнейшее расширение двойного слоя, дальнейшее снижение концентрации электролита и продолжающееся снижение суммарных сил притяжения между частицами. Для более высокого уплотняющего усилия, которое требует большей работы, наиболее близки к параллельности будут частицы глины.

11.2.2.4. Теория уплотнения, основанная на теории поля энергии частиц

Теория поля энергии частиц (глава 2), представленная в настоящем издании, призвана объяснить взаимосвязь массы и влажности почвы в окружающей среде. Как показано на рисунке 11.1, выделяют две различные характеристики почвы, существующие в соотношении веса образца к содержанию воды: сухая сторона и влажная сторона. Поскольку поведение почвы на этих двух этапах существенно отличается, необходимы дальнейшие объяснения этих отношений, и теория поля энергии частиц может помочь прояснить это соотношение.

1. На сухой стороне расположение частиц почвы контролируется механической энергией, как описано в теории Проктора, заставляя меньшие частицы почвы проникать в пустоты между более крупными частицами путем уплотнения. Нет существенного физико-химического взаимодействия в системе вода–почва в сухом состоянии.

2. С влажной стороны на взаимодействие между частицами почвы и воды будут влиять как физико-химическое, так и проницаемое поведение почвы, как описано в теории Ламбе.

3. В случае загрязненной почвы физико-химические и биологические эффекты влияют на взаимодействие почвы и воды, как обсуждалось в разделах 5.7 и 5.8. В обоих случаях (2 и 3) на взаимодействия влияют тепловые, электрические, химические и электромагнитные силы.

11.2.3. Влияние органики на уплотнение

Исторически органические почвы не использовались в области геотехники. Это связано прежде всего с тем, что органические почвы (1) имеют низкую прочность на сдвиг, (2) имеют тенденцию к чрезмерной сжимаемости и (3) имеют тенденцию со временем разрушаться. Эти характеристики нежелательны для инженерного применения; следовательно, такие почвы выбрасываются или в большинстве случаев используется в нижних слоях глубокого заполнения. Однако существует много ситуаций, когда органические почвы желательны. Эти примеры включают области, в которых проницаемость должна оставаться высокой, а удельный вес почвы должен оставаться низким. Конкретные области применения – сельское хозяйство, борьба с опустыниванием и городское улучшение грунта. В каждом из этих случаев высокие уровни уплотнения почвы имеют потенциальные неблагоприятные последствия.

Franklin и соавторы (1973) изучали влияние содержания органики на уплотнение почвы. Материалами, которые они изучали, были природные верхние или слабоорганические почвы и смеси неорганической почвы и торфа, приготовленные для получения различных степеней органического содержания.

Они обнаружили, что максимальный вес сухой единицы быстро уменьшается при содержании органических веществ более, чем 8–10 %. Они также обнаружили, что оптимальное содержание влаги в почве увеличивается вместе с содержанием органических веществ.

Уплотнение также является общеизвестной причиной снижения гидратации, роста и продуктивности растений. Raneу (1971), суммируя эффекты уплотнения почвы, утверждает, что влияние уплотнения на растения не является прямым. Скорее, это пагубные изменения в свойствах почвы, вызванные уплотнением. Все эти изменения связаны с уменьшением пустот в почве. Поскольку скорость потока воды через пустое пространство почвы связана с четвертой степенью радиуса поры (если радиус поры уменьшится вдвое, скорость потока уменьшается в шестнадцать раз), уплотнение сильно влияет на передачу воды. Это важно не только для растений, но и для пополнения водоносных горизонтов через перколяцию. Эти воздействия на почву непосредственно увековечивают последствия опустынивания, как обсуждалось в работах Fang и Chaney (1988). При увеличении уплотнения почвы преобладает снижение продуктивности растений.

Воздушный поток через пустоты почвы также важен, потому что почвенные микроорганизмы и корни растений нуждаются в постоянном поступлении кислорода для дыхания. Grable (1971) обсуждал способы, которыми воздушная передача через почву осуществляется вредным образом. Передача воздуха, как путем адвекции, так и диффузии, происходит главным образом через самые большие пустоты в почве, которые способны быстро заполняться после выпадения осадков. Уплотнение значительно уменьшает эти большие пустые пространства и может почти полностью устранить поток воздуха через почву.

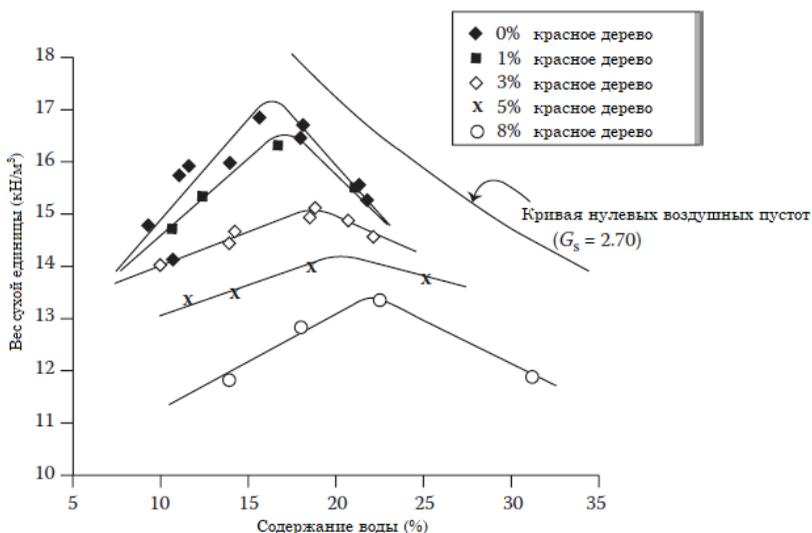


Рисунок 11.3. Масса сухой единицы как функция содержания воды и процента красного дерева (данные из: Lancaster, J. R. et al. [1996], 3rd Int. Symp. on Environmental Geotechnolgy, v. 1, pp. 152–161. С разрешения).

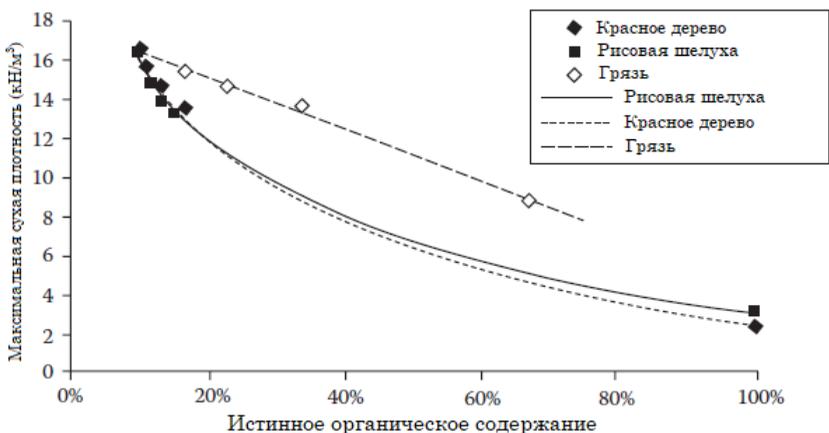


Рисунок 11.4. Сравнение максимальной массы сухих единиц в зависимости от истинного содержания органических веществ и типа материала (данные из: Lancaster, J. L. et al. 1996, 3rd Int. Symp. on Environmental Geotechnolgy, v. 1, pp. 152–161.).

Уплотнение также может повлиять на тепловой поток в почве, что, возможно, не так очевидно, как в случаях с воздухом и водой. Увеличение удельного веса за счет увеличения поверхностного контакта с грунтом напрямую увеличивает теплопроводность. Уплотнение также имеет два менее непосредственных влияния на теплопередачу. Благодаря уплотнению почвы и, благодаря этому, уменьшению пустого пространства, содержание воды в почве уменьшается. Это снижение содержания воды также приводит к увеличению теплопроводности. Из-за вышеупомянутых эффектов (уменьшение потока воды и воздуха) уплотнение почвы также уменьшает растительный покров, что приводит к уменьшению теневого покрова и повышению температуры поверхности почвы. Эти три фактора в совокупности повышают температуру почвы, что может оказать неблагоприятное воздействие на корни растений.

Lancaster и соавторы (1996) и Mullen (1987) провели исследования влияния органики на уплотнение почвы. Они провели свои эксперименты, смешивая различные массовые проценты органического вещества с почвой SP-SM (приблизительно 10 % пройденного через сито № 200 и 10,8 % содержания органики), а затем проводя модифицированные тесты на определение плотности грунта методом Проктор (ASTM D1557, метод А). Процент органического содержания определяли с использованием потерь при процедуре зажигания. Были использованы результаты для ряда различных органических материалов (то есть волокнистых органических материалов: соломы, измельченной коры красного дерева, рисовой шелухи; неволокнистых органических материалов: осадков городских сточных вод). Типичный график зависимости массы сухого образца от содержания воды для различных процентов измельченной коры красного дерева представлен на рисунке 11.3. Обзор показывает, что максимальный вес сухой единицы уменьшается, а оптимальное содержание воды увеличивается с

увеличением содержания органических веществ. Это происходит как для волокнистых, так и для неволокнистых материалов. На основании этих ограниченных результатов на рисунке 11.4 показана фактическая зависимость между максимальной сухой единицей массы и истинным содержанием органики в волокнистом органическом материале. В отличие от этого, соотношение между максимальной сухой единицей веса и истинным содержанием органических веществ для неволокнистого (илового) органического материала является линейным. Истинное органическое содержание определяется, как представлено в следующих разделах. Первоначально процент добавленного органического материала определяется с использованием следующего уравнения:

$$\% \text{ORG}_{\text{sc}} = \frac{M_{\text{org}}}{M_{\text{sw}}} \quad (11.1)$$

где
 $\% \text{ORG}_{\text{sc}}$ – процент органического материала;
 M_{ogr} – масса органики в пробе;
 M_{sw} – масса влажной почвы.

Фактический процент органического содержания в почве в уплотненном состоянии (ORG), включающий в себя как исходное органическое содержание, так и добавленное, может быть рассчитан следующим образом:

$$\% \text{ORG}_s = \frac{(\% \text{ORG}_{\text{sc}})(\% \text{ORG}_{\text{org}}) + (100 - \% \text{ORG}_{\text{sc}})(\% \text{ORG}_{\text{ss}})}{100} \quad (11.2)$$

где
 $\% \text{ORG}_{\text{sc}}$ – процент добавленного органического вещества;
 $\% \text{ORG}_{\text{org}}$ – процент добавленной органической почвы, которая на самом деле является органическим веществом;
 $\% \text{ORG}_{\text{ss}}$ – процент органического вещества основного грунта.

Другое определение органического содержания: это истинное органическое содержание, которое определяется следующим образом:

$$\% \text{ORG}_t = \frac{\% \text{ORG}_s}{100 + \% \text{ORG}_s} \quad (11.3)$$

Обзор рисунка 11.4 показывает, что как для волокнистого, так и для неволокнистого органического материала максимальный вес сухого элемента уменьшается с увеличением содержания органики.

Сравнение между оптимальным содержанием воды и истинным содержанием органических веществ представлено на рисунке 11.5. Обзор показывает, что оптимальное содержание воды увеличивается для волокнистых органических материалов и уменьшается для неволокнистых (иловых) органических материалов. Это явление, вероятно, связано с поглощением воды измельченной красной древесиной и рисовой шелухой по сравнению с осадком.

11.2.4. Влияние легкого неорганического материала на уплотнение

Сокращение потока отходов, поступающих на свалку, может быть достигнуто путем сочетания сокращения количества мусора, переработки и повторного использования. В число компонентов, попадающих на свалку, входит полистирол или «пенополистирол», который широко используется в качестве контейнеров для напитков и упаковочного материала. Этот материал легко сжимается до меньшего объема, а вес полистирола (EPS), производимого в Соединенных Штатах, составляет 5,14 миллиона фунтов в год (Modern Plastics, 1991). Предлагается альтернативное использование для этого отходного материала в качестве добавки к почве как средства изменения механических свойств почвы в инженерных целях. В частности, было показано, что уменьшение массы инженерного наполнителя имеет смысл в качестве средства снижения давления вскрышных пород, а также в сельском хозяйстве. Включение в почву агента, который существенно различается по физическим свойствам (удельный вес и удержание влаги), демонстрирует ожидаемый эффект снижения массы почвы при исследовании взаимосвязей массы материала с объемом. График содержания воды в зависимости от максимальной массы сухого элемента и в зависимости от увеличения процентного объема полистирола показывает, что уплотнение происходит способом, подобным тому, который наблюдается для измельченного красного дерева и почвы. График зависимости массы сухого продукта от процентного объема пенополистирола представлен на рисунке 11.6. Обзор показывает, что при увеличении процентного объема вещества наблюдается очевидное линейное снижение максимального веса единицы.

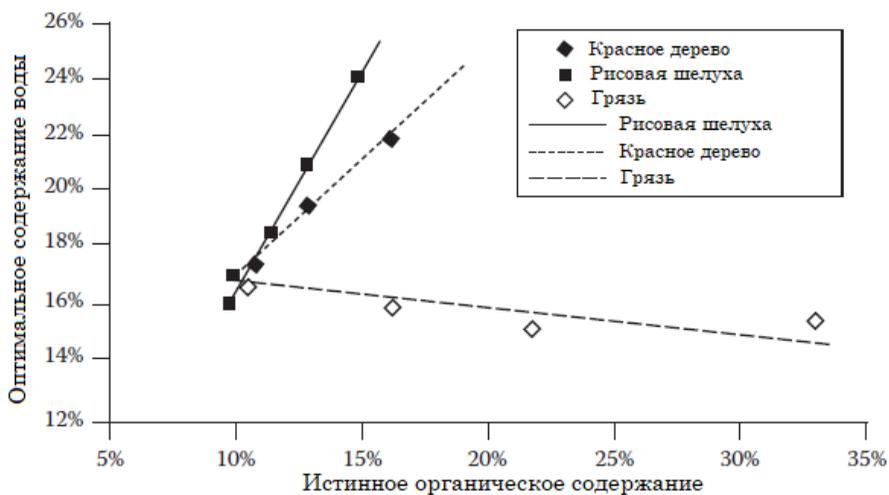


Рисунок 11.5. Сравнение оптимального содержания воды в зависимости от содержания органики и типа материала (данные из: Lancaster, J. R. et al. [1996], 3rd Int. Symp. on Environmental Geotechnology, v. 1, pp. 152–161. С разрешения).

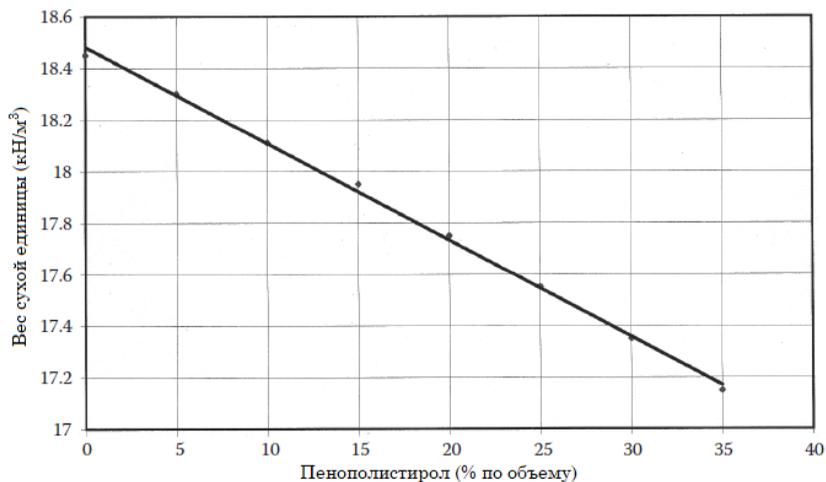


Рисунок 11.6. Масса сухого образца как функция объемных процентов пенополистирола.

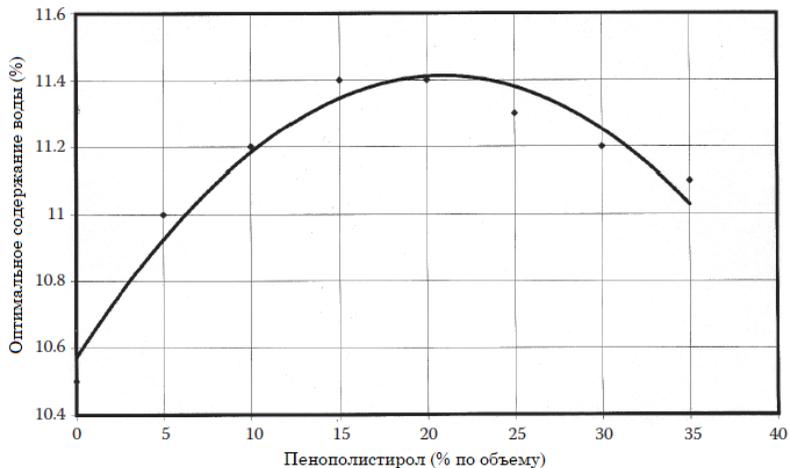


Рисунок 11.7. Оптимальное содержание воды в зависимости от объемных процентов пенополистирола.

Добавление пенополистирола в почву оказывает влияние на оптимальное содержание воды: сначала оно увеличивается, а затем уменьшается, см. рисунок 11.7. Эта тенденция, вероятно, связана с увеличением пустого пространства, первоначально обеспечиваемого пенополистиролом, что позволяет большему количеству воды попадать в почву. Клеточная структура пенополистирола также обеспечивает некоторую адсорбцию влаги. Затем при приблизительно 20 % пенополистирола пустоты начинают закрываться под воздействием уплотняющего усилия, поскольку остается меньше почвенного каркаса, чтобы выдержать нагрузку. Закрывание пустоты предотвращает дальнейшее поглощение влаги.

11.2.5. Факторы, влияющие на результаты испытаний на уплотнение

Факторы, влияющие на результаты испытаний на уплотнение, обсуждались многими исследователями (Johnson и Sallberg, 1962; Hilf, 1991). Некоторые дополнительные комментарии о факторах окружающей среды, влияющих на результаты испытаний, представлены ниже.

1. Чтобы избежать нерегулярных и бессмысленных кривых для системы удельный вес – влажность в лабораторных и полевых испытаниях на высокосвязных почвах, нужно, чтоб влага равномерно распределялась по вторичным почвенным агрегатам. Это может занять от 1 до 7 дней в случае сильно связных почв, к которым вода добавляется в сухом состоянии. Это время может быть сокращено за счет использования живого пара.

2. Поскольку вязкость воды, а также степень и интенсивность взаимодействия минеральных поверхностей с водой являются функциями температуры, отношения влажности и плотности также зависят от температуры. Как правило, температурный эффект увеличивается с увеличением удельной поверхности (поверхность на единицу объема) и, следовательно, с содержанием глины, а также является функцией глинистого минерала и способных к обмену ионов и электролитов в водной фазе. Как обсуждалось в разделе 8.4, указано, что характеристики уплотнения мерзлого грунта значительно отличаются от характеристик незамерзшего грунта. На рисунке 11.8 показано влияние температур замерзания на уплотнение илового мелкого песка. Значительны эффекты, когда температура опускается ниже точки замерзания.

3. Процедуры уплотнения существенно влияют на максимальный вес образца и ОМС. Четыре процедуры испытаний используются для иллюстрации воздействия на уплотнение, включая повторное приготвление на одной и той же почве и уплотнение на свежей почве, отобранной при различных условиях распределения влаги. Результаты этого тестирования почвы представлены на рисунке 11.9.

4. Влияние обменных ионов на характеристики уплотненной почвы путнам, отраженное на результатах проникновения конуса, представлено на рисунке 11.10. Тесты на уплотнение проводились на основе стандартного испытания Проктора (ASTM D698). Получены результаты максимальной сухой плотности, оптимального содержания влаги (ОМС) и проникновения в конус. Как показано на рисунке 11.10, окруженные точки представляют данные в ОМС. Экспериментальные данные показали, что калиевая почва получила более высокую максимальную сухую плотность и более низкий уровень ОМС.

5. Что касается лабораторных и полевых методов уплотнения, то отношение веса единицы к содержанию влаги в лабораторных и полевых условиях существенно различается, поскольку условия окружающей среды в обоих условиях различны. В лаборатории условия испытаний определяются стандартами ASTM или AASHTO, такими как температура и поровая жидкость. Однако в полевых условиях местные факторы окружающей среды, такие как температура, осадки, миграция загрязнений и т. д., не могут контролироваться

должным образом по сравнению с лабораторными условиями. Кроме того, на результаты уплотнения влияют оборудование и процедуры уплотнения. Однако оборудование и процедуры, используемые как в лаборатории, так и в полевых условиях, различны, и, следовательно, полученные результаты также различны. Даже внутри лаборатории или в полевых условиях оборудование или процедуры также различаются. На рисунке 11.11 представлены результаты двух типов динамических методов, используемых в лаборатории, а именно: стол для встряхивания и молоток. В этом исследовании также оценивается влияние содержания гравия в почвенной смеси.

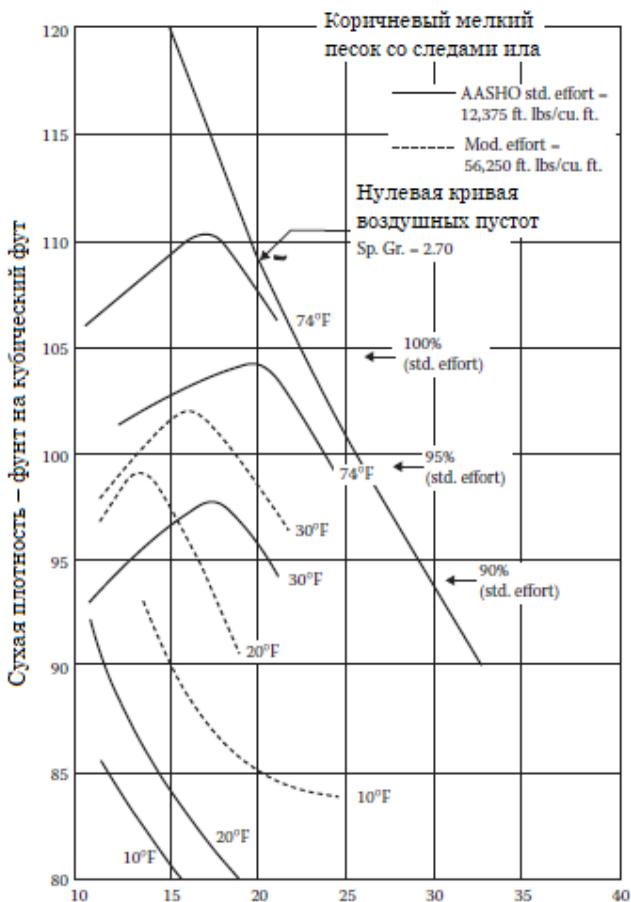
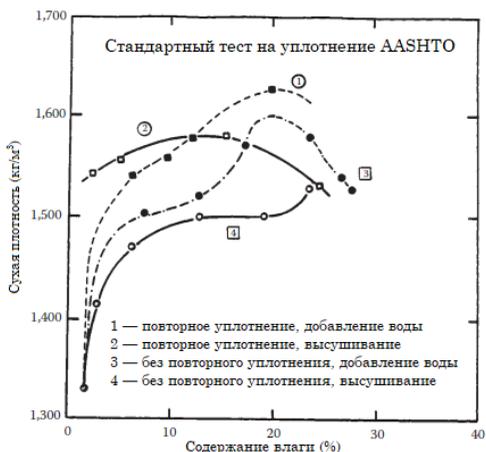


Рисунок 11.8. Влияние температур замерзания на уплотнение илового мелкого песка (по Hofmann, U. [1961], *Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft*, v. 38, pp. 201–207; cited by TRB [1971], *Transportation Research Board, National Academy of Engineering, Washington, D.C.* Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не защищен авторским правом).



Данные о почве

Верхний предел пластичности = 72
 Предел пластичности = 35
 Предел усадки = 26

Рисунок 11.9. Влияние рекомпакции и распределения влаги на единицу веса – кривая влажности (по Tamez, E. [1957], Some Factors Affecting the Dynamic Compaction Test, ASTM STP 232, pp. 54–66).

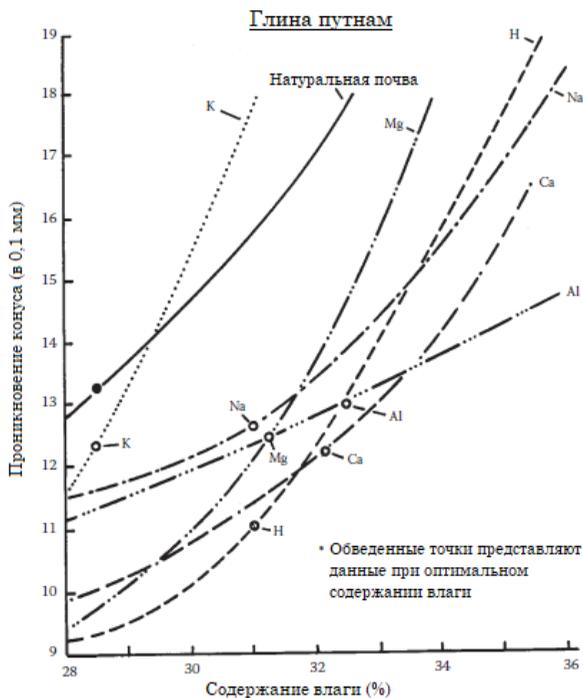


Рисунок 11.10. Влияние обменных ионов на характеристики уплотняемой почвы в результате проникновения конуса (по Winterkorn, H. F. and Mootman, R. B. V. [1941], Proc. 21st Annual Meeting, HRB, pp. 415–434. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не подлежит защите авторских прав).

11.3. ДИНАМИЧЕСКАЯ КОНСОЛИДАЦИЯ (ДИНАМИЧЕСКАЯ ДЕНСИФИКАЦИЯ)

11.3.1. Общее обсуждение

Динамическое уплотнение или динамическая консолидация – это механический процесс для уплотнения рыхлых отложений на больших глубинах. Процесс, используемый в настоящее время, не нов. Крупнейший строительный проект с использованием этой техники был во время Второй мировой войны, в начале 1940 года, когда в Куньмине, на юго-западе Китая, был построен аэродром для приземления бомбардировщика США Flying Tiger B-29. Этот метод часто используется во всем мире, особенно в Китае, но отсутствие гласности не способствует научным исследованиям этого процесса. Ранняя модель оборудования для динамического уплотнения, использовавшегося в 1957 году в Китае, показала, что общий вес песта около 36–72 кН упал с 10 метров.

В 1970 году группа Менарда (Menard и Broise, 1975) представила научный подход к анализу процесса динамического уплотнения, в который она включила вибрационное поведение во время процесса в соответствии с основными геотехническими свойствами почвы. С тех пор этот метод широко использовался во многих крупномасштабных строительных проектах для уплотнения гранулированного материала на больших глубинах, и он был расширен и показывает некоторый положительный результат на глинистых месторождениях. Оборудование для динамического уплотнения, используемое в настоящее время в строительстве, имеет общий вес песта до 356 кН (40 тонн), а высота сброса достигает 40 м. Благодаря повышению грузоподъемности крана, энергия удара о поверхность земли может достигать $10,8 \times 10$ кДж (4000 фут-тонна).

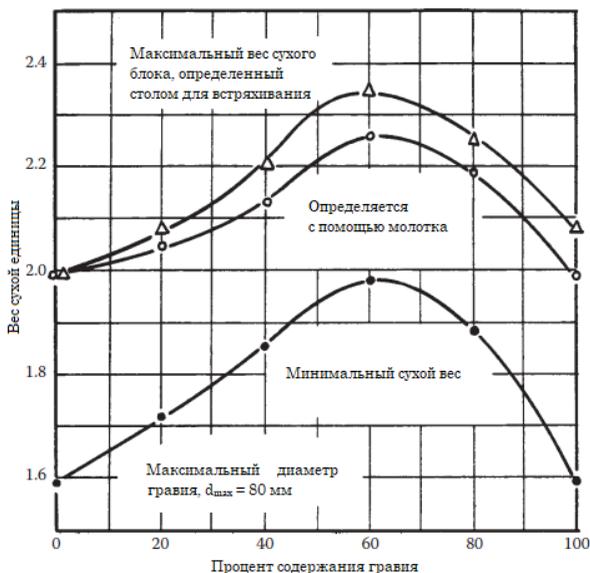


Рисунок 11.11. Процент содержания гравия в расчете на сухую единицу веса почвы (по Shi, Y. W. [1981], Proc. 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE), v. 1, pp. 1–5).

11.3.2. Соотношение нагрузки и деформации и эффективная глубина

Рисунок 11.12 иллюстрирует типичное взаимодействие почвы и нагрузки в лабораторных исследованиях во время динамической консолидации (уплотнения). Как показано на рисунке 11.12, вес (W_x) свободно падает с заданной высоты (H_x). Радиус (r) и глубина (δ) кратера и эффективная глубина (D_e) также указаны на рисунке 11.12.

Эффективная глубина (D_e) определяется, как показано на рисунке 11.12, как то, насколько глубоко ударная часть (вес), свободно сброшенная с определенной высоты, будет влиять на материал заполнения ниже поверхности земли. Menard и Broise (1975) предположили, что эффективная глубина или глубина влияния равна следующему показателю.

11.3.2.1 Метод Менарда и Бруза (1975)

$$D_e = [W_x h_x]^{0,5} \quad (11.4)$$

11.3.2.2 Модифицированный метод Леонардса и соавторов (1980)

$$D_e = 0,5 [W_x h_x]^{0,5} \quad (11.5)$$

11.3.2.3. Метод Лукаса (1980)

$$D_e = (0,65-0,80) [W_x h_x]^{0,5} \quad (11.6)$$

где

D_e – эффективная глубина или глубина воздействия, м

W_x – вес песта, метрические тонны

h_x – высота свободного падения, м

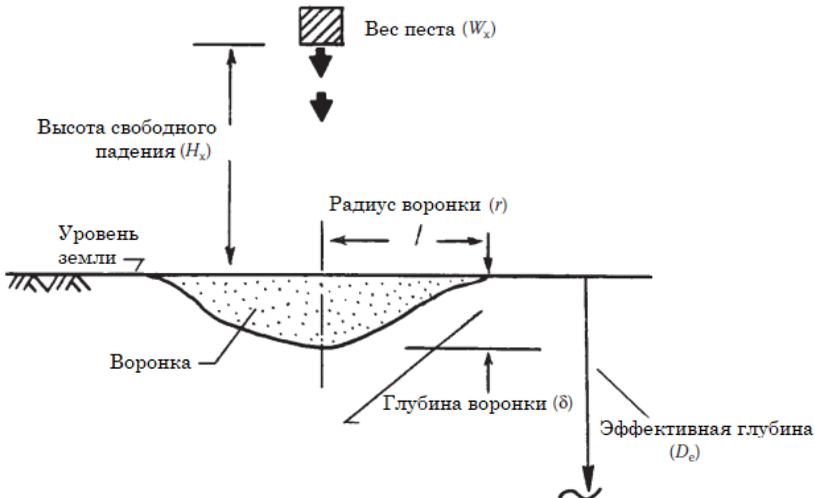


Рисунок 11.12. Соотношение нагрузки и прогиба при динамической консолидации.

11.3.2.4. Метод Чарлза и соавторов (1981)

На основании полевых исследований, учитывающих прочность утрамбованного грунта, предлагается следующее, как показано в уравнении 11.7:

$$D_e = 0,4d [(E/A) (1/d) (1/s)]^{0,5} \quad (11.7)$$

где

d – диаметр песта

E – энергия приложенного удара

A – зона воздействия

s – недренированная прочность на сдвиг почвы

Применяемая энергия (уравнение 11.7) выражается через энергию на единицу площади ударной поверхности песта. Luongo (1992) представил данные о параметрах энергии удара из историй различных полевых проектов. Hayward Baker Co., опытная консалтинговая фирма, которая часто проводит полевые испытания на динамическое уплотнение, предлагает минимальную приложенную энергию в 200 т/м². Inyang (1992a) предложил концепцию удельной энергии, чтобы количественно описать величину приложенной энергии. В таком случае удельная энергия может быть оценена следующим образом:

$$SP = N(E) (H) (A) (D) \quad (11.8)$$

где

SP – удельная энергия, выраженная в виде энергии на единицу объема

N – количество ударов, нанесенных в одной точке

E – приложенная кинетическая энергия

A – площадь ударной поверхности молотка

D – толщина уплотненного слоя (слоев) почвы

11.3.2.5. Метод Фанга–Эллиса (1983, 1995a)

Уравнения с 11.4 по 11.6 были использованы для процесса укрепления грунта на месте и управления полем. Уравнения не учитывают тип материала заполнения, размер песта и степень насыщенности грунта. Эти дополнительные параметры рассматриваются в работах Fang и Ellis (1983), на которые ссылается Fang (1995a) при оценке эффективной глубины при лабораторных исследованиях. Чтобы понять процесс уплотнения, необходимо изучить механизм взаимодействия грунта и песта. Как показано на рисунке 11.12, когда навесной материал применяется к массе почвы, деформация будет вызвана немедленной упругой и неупругой деформацией структуры почвы. Поровая вода вытекает из почвы, что приводит к переориентации частиц почвы. Этот процесс зависит от свойств почвы, условий дренажа, истории напряжения и условий окружающей среды. Коэффициент эффективной глубины (ψ), показанный на рисунке 11.13, является функцией степени насыщения и отношения радиус–глубина во время динамического уплотнения, где эффективная глубина (D_e) может быть затем вычислена из уравнения 11.9.

$$D_e = \psi [W_x h_x]^{0,5} \quad (11.9)$$

где ψ = коэффициент эффективной глубины.

Динамический процесс консолидации часто использовался в крупномасштабных строительных проектах для уплотнения глубоких гранулированных почв и в последнее время для уплотнения на свалках и в пустынных районах.

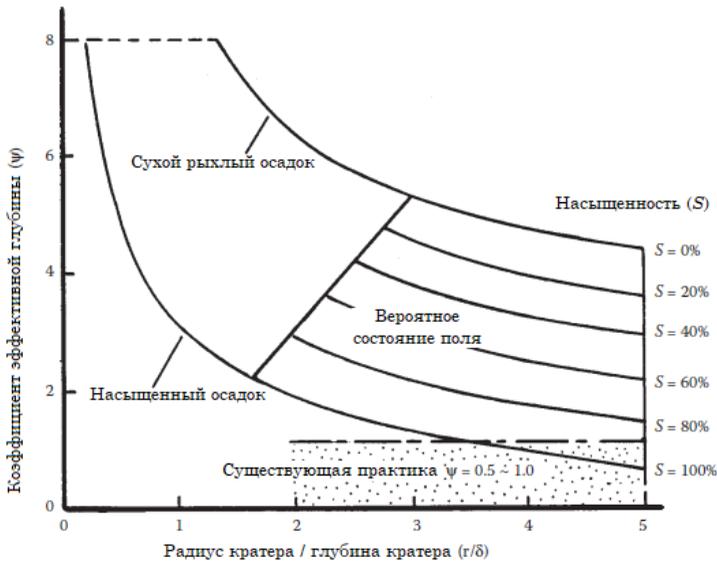


Рисунок 11.13. График для определения коэффициента эффективной глубины (по Fang and Ellis [1983]; cited by Fang, H. Y. [1995], GREEN'93, U.K., Waste Disposal by Landfill, R. W. Sarsby, ed., A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 47–72).

11.4. КОНСОЛИДАЦИЯ

11.4.1. Общее обсуждение

Консолидация является одним из важных процессов в геотехнике. Она учитывает расчеты конструкций, основанных на сжимаемых почвенных отложениях, и ее знание, наряду с соответствующими лабораторными испытаниями, позволяет рассчитать общую осадку, а также ее временный характер. Обширные исследования по этому предмету в различных аспектах, как теоретических, так и экспериментальных, проводились с начала 1920-х годов. Taylor (1948) провел всесторонние лабораторные исследования по различным аспектам, включая дренажные системы, вторичное сжатие и стандартизацию процедур испытаний. Рисунок 11.14, будучи схематической диаграммой, иллюстрирует кривую расчета в зависимости от времени. Также показано, что теория консолидации Терцаги касается только механической энергии. Другие причины, такие как физико-химические и биологические, не включены в теорию Терцаги. Совсем недавно, теории консолидации, отличные от концепции Терцаги, были внедрены в геотехнологию окружающей среды, включая

электрокинетический, термический и электромагнитный подходы. Использование физико-химического подхода в качестве механизма консолидации мягких глин также предлагается (Akagi, 1994).

11.4.2. Теория консолидации Терцаги

Когда нагрузка применяется к насыщенной сжимаемой массе почвы, нагрузка обычно первоначально переносится водой в порах, потому что вода относительно несжимаема по сравнению со структурой почвы. Давление, которое образуется в воде из-за увеличения нагрузки, называется гидростатическим избыточным давлением, потому что оно превышает это давление из-за веса воды. Если вода вытекает из пор почвы, избыточное гидростатическое давление и его градиент постепенно уменьшаются, и приращение нагрузки смещается в структуру почвы. Другими словами, передача нагрузки сопровождается изменением объема почвенной массы, равного объему выходящей воды. Этот процесс известен в механике грунта как уплотнение. Была предложена теория, относящаяся к нагрузке, времени и изменению объема, которая стала известна как теория консолидации Терцаги. Одним из основных допущений в теории является то, что изменение объема и отток поровой воды происходят только в одном измерении. По этой причине ее иногда называют теорией одномерной консолидации Терцаги.



Рисунок 11.14. Схематическая диаграмма, иллюстрирующая осадание в зависимости от времени для разлагаемого материала.

Основные выводы из теории консолидации Терцаги заключаются в том, что она породила два основных уравнения: (1) уравнение расчета и (2) темп времени. Степень консолидации является связующим звеном между этими двумя уравнениями. Другие параметры, связанные с теорией, включают индекс сжатия (в см^3), коэффициент сжимаемости (a_v) и коэффициент консолидации (c_v). При стандартном одномерном тесте на консолидацию (ASTM D2435) коэффициент проницаемости k можно вычислить из следующего уравнения:

$$k = c_v m_v \gamma \omega \quad (11.10)$$

где c_v можно получить из обычного теста на уплотнение, а m_v известен как коэффициент объемной сжимаемости. Это равно:

$$m_v = a_v / 1 + e \quad (11.11)$$

Значение m_v в уравнении 11.11 используется для указания сжатия глины на единицу первоначальной толщины из-за увеличения давления на единицу. Единица измерения у m_v такая же, как и у a_v (см/кг), где e – средний коэффициент пустот для приращения во время испытания на уплотнение. Zeevaert (1983) сообщил, что значение k , данное в уравнении 11.11, представляет собой линейную зависимость от коэффициента консолидации c_v , когда m_v изменяется от 0,1 до 0,001 см/кг. Кроме того, сравнение k , рассчитанное по уравнению 11.11 и по обычным лабораторным испытаниям на проницаемость различных типов почв, показано на рисунке 11.15. Чтобы выразить расширение, которое может произойти при разгрузке образца почвы, обычно используют индекс разбухания (c_s), как показано на рисунке 11.15. Значения c_s всегда намного меньше значений c_c для первичного сжатия. Типичное значение для бостонской голубой глины варьируется от 0,07 до 0,09, а для мягкого ила из шанхайского региона (раздел 13.10) – от 0,02 до 0,04.

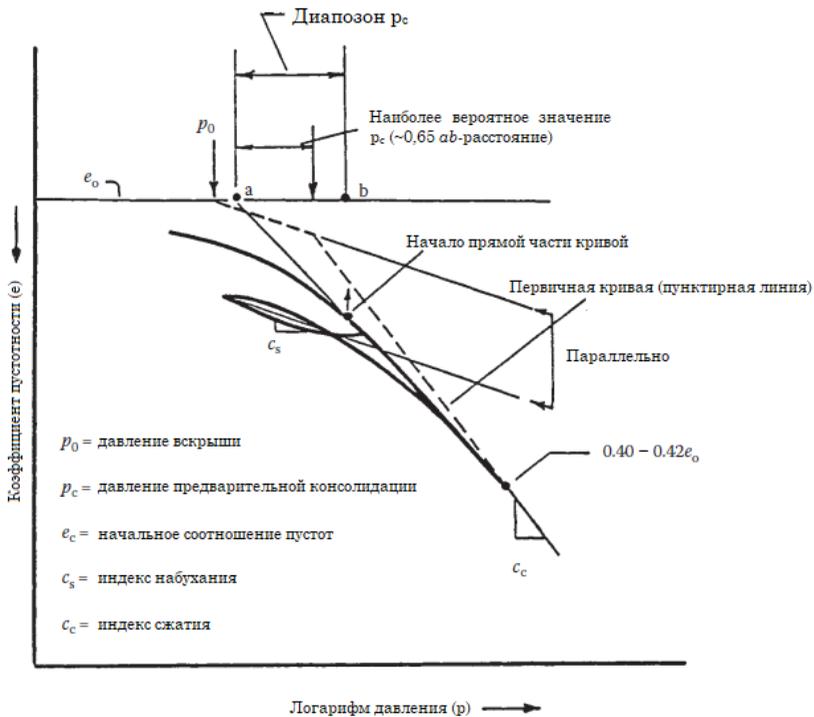


Рисунок 11.15. Типичное соотношение пустот в зависимости от кривой логарифмического давления.

11.5. НОРМАЛЬНО УПЛОТНЕННЫЕ И СВЕРХУПЛОТНЕННЫЕ ГЛИНЫ

11.5.1. Общее обсуждение

Как говорилось в предыдущих разделах, из-за истории напряжения естественного отложения почвы эти отложения могут быть чрезмерно консолидированы. Если максимальное межзеренное давление больше, чем текущее давление вскрыши, p_0 , то это межзерновое давление называется давлением до уплотнения или пережитым давлением. Существует множество причин и факторов, вызывающих эту предварительную консолидацию, включая геологические особенности, изменение порового давления, изменение структуры почвы и изменение условий окружающей среды, как пишут Brumund и соавторы (1976) и Holtz и Kovacs (1981). Причины предварительной консолидации приведены в таблице 11.1.

11.5.2. Давление предварительной консолидации и коэффициент избыточной консолидации

11.5.2.1. Давление предварительной консолидации

Если давление предварительной консолидации вызвано условиями нагружения, то его можно оценить по коэффициенту пустотности (e) по отношению к логарифмическому давлению, p -кривой, как показано на рисунке 11.15. Методы оценки p_c были предложены многими исследователями, как обсуждается в стандартных учебниках. Диапазон значений p_c указан на рисунке 11.15.

11.5.2.2. Коэффициент избыточной консолидации (OCR)

Соотношение между давлением предварительной консолидации (p_c) и давлением вскрыши (p_0) называется коэффициентом избыточной консолидации (OCR), который высчитывается по формуле:

$$\text{OCR} = p_c / p_0 \quad (11.12)$$

где

OCR – коэффициент избыточной консолидации

p_c – давление предварительной консолидации

p_0 – давление вскрыши

Если OCR = 1,0, то почвенное месторождение называется нормально-консолидированной глиной.

Если OCR > 1,0, то оно называется сверхконсолидированной глиной.

Если OCR < 1,0, его называют недоконсолидированной глиной.

Таблица 11.1. Причины переуплотнения почвы.

Причины	Типы	Энергетическое поле
Загрузка	Давление вскрыши Предзагрузка Прошлые структуры Геологическая нагрузка (оледенение)	Механическое энергетическое поле
Экологическая (химическая, физико-химическая, геомикробиологическая)	Процесс выщелачивания Ионный обмен Температура и тепло Замораживание–оттаивание Намокание–высыхание Кислотный дождь Колебания грунтовых вод	Энергетическое поле нескольких сред

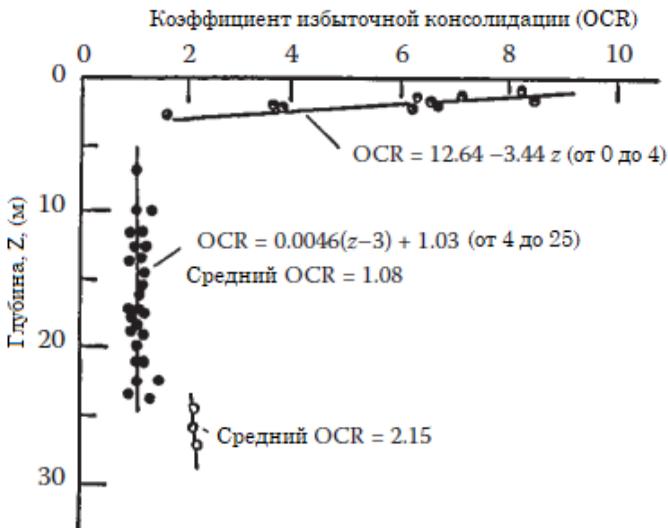


Рисунок 11.16. Особенности сверхуплотнения отложений аллювия (данные из университета Тунци).

Степень переуплотнения глины можно классифицировать следующим образом: (1) слегка переуплотненная глина: диапазон OCR больше 1,0 и меньше 2,5; (2) сильно переуплотненная глина: если значение OCR превышает 8,0. Значение OCR достигает 35. Это значение OCR может быть использовано для указания истории напряжений подземного состояния почвы, как показано на рисунке 11.16. Изучая рисунок 11.16, можно увидеть, что есть три различных подповерхностных слоя с различными значениями OCR, которые показывают историю напряжений шанхайской мягкой глины.

11.5.2.3. Характеристики сдвига сверхконсолидированной глины

На основании типичной кривой напряжение–деформация, изменения объема и давления в поровой воде обычно консолидированных и сверхконсолидированных глин, рассмотренных в стандартном тексте (Ladd, 1971; Holtz и Kovacs, 1981), можно утверждать, что (1) образец сверхконсолидированной почвы имеет большую прочность, чем у обычной консолидированной глины; (2) максимальный сдвиг сверхконсолидированной глины имеет место при значительно меньшей деформации, чем у обычно консолидированного образца; (3) для давления в поровой воде нормально уплотненный образец развивает положительное давление в поровой воде; однако для сверхконсолидированного образца после небольшого начального увеличения давление в поровой воде оно становится отрицательным; (4) изменение объема для сверхконсолидированной глины является расширением во время сдвига, в то время как обычно консолидированная глина сжимается или консолидируется во время сдвига; (5) огибающие разрушения по Мору для общих и эффективных напряжений различны для обычно консолидированных и сверхконсолидированных глин. Для нормально уплотненной глины угол внутреннего трения, то есть ϕ (общее напряжение), меньше, чем ϕ' (эффективное напряжение), и часто он составляет около половины ϕ' . Однако для сверхконсолидированной глины ϕ' меньше, чем ϕ .

11.5.3. Факторы, влияющие на результаты испытаний консолидации

11.5.3.1. Температура или тепло

Влияние температуры или тепла на сжимаемость обсуждалось в разделе 8.12. Дополнительную информацию об изменениях объема в процессе консолидации из-за высокой температуры можно найти в работах Tsuchida и соавторов (1991) и Towhata и соавторов (1993).

11.5.3.2. Поровая жидкость

Поровые жидкости оказывают существенное влияние на сжимаемость почвы. Как сообщает Waidelich (1958), испытания на уплотнение проводились с тремя глинами и семью органическими и неорганическими жидкостями, включая воду. Данные показывают, что соответствующие индексы для глин с нерасширяющимися решетками (каолинит и белая глина) меняются в зависимости от дипольного момента. Для каолинита, чем больше дипольный момент используемой жидкости, тем больше наклон кривой сжатия, отраженный индексом сжатия (c_c). Для белой глины (галлуазита): чем больше дипольный момент используемой жидкости, тем меньше наклон кривой сжатия.

11.5.3.2.1. Ненабухающая глина

Жидкости анилин ($C_6H_5NH_2$) и вода (H_2O) являются двумя исключениями, общими как для каолинита, так и для белой глины. Возможно, что анилин, участвующий в обмене оснований с двумя нерасширяющимися почвами, вызывает образование анилиновых почв. Вода является другим исключением при набудении. Вода является одной из наиболее распространенных жидкостей, и тем не менее о ней известно очень мало. Метиловый спирт (CH_3OH) является еще одним исключением в случае белой глины. Эта жидкость, имеющая

молекулярную структуру, очень похожую на воду, иногда действует подобно воде. Как обсуждал Waidelech, дипольный момент можно рассматривать как локализованную силу, связанную внутри самой молекулы. Частицы ненабухающей глины не поглощают жидкости внутри решетки, как частицы набухающей глины.

11.5.3.2.2. Набухающая глина

Монтмориллонитовая глина, обладающая расширяющейся решеткой, в меньшей степени подвержена влиянию дипольного момента, чем глины с нерасширяющейся решеткой. Скорее, диэлектрическая проницаемость, которая является интегральной функцией дипольного момента и молекулярной структуры, по-видимому, оказывает более доминирующее влияние на глинистые минералы. Leonards и Girault (1961) сообщили об влиянии поровой жидкости на сжимаемость ненарушенных образцов глин Мехико. В их исследовании природная поровая вода была заменена четыреххлористым углеродом (CCl_4) путем циркуляции поровой жидкости через образец до тех пор, пока сточные воды не стали чистым четыреххлористым углеродом. На рисунке 11.17 показано влияние кислоты и воды на сжимаемость латеритного грунта. Получены значительные изменения соотношения пустот.

11.5.3.3. Обменные ионы

На рисунке 11.18 также показаны коэффициенты сжимаемости (c_v) как функции обменных катионов и диапазона консолидации, а также коэффициент консолидации c_v для различных гомоионных почв как функция их пустотных отношений. Поскольку сжимаемость указывает на интенсивность сил, удерживающих водные пленки, этот рисунок дает представление о способности воды фиксировать глину путями в зависимости от обменных ионов.

На основании данных, показанных на рисунке 11.18, силы удержания воды уменьшаются в ряду: (1) коэффициент пустот – 1,1: $Na > H > Mg = Ca > K$ = естественная почва; (2) отношение пустот – 1,5: $Na > Ca > Mg >$ природная почва $> K$. Огромная разница между действием ионов Na и K впечатляет.

11.6. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И НАРУШЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВЫ

11.6.1. Характеристики почвы перед разрушением

Когда нагрузка прикладывается к почвенной массе, то деформация почвы будет упругой или неупругой, пока деформация не станет неприемлемо большой; тогда говорят, что почвенная масса «рухнула». Следовательно, прочность почвы является важным критерием при оценке того, как почва может выдерживать такую приложенную нагрузку. Эта нагрузка может упоминаться в литературе как критическая нагрузка. Однако эта критическая нагрузка связана с поведением и предаварийным состоянием той же почвы. В настоящее время большинство инженеров интересуется только критической нагрузкой на почву, а не предотказное состояние почвы. К сожалению, многие преждевременные и прогрессирующие разрушения часто происходят без надлежащих объяснений, хотя предотказное

состояние и состояние разрушения взаимосвязаны. Другими словами, на стабильность массы почвы влияет не только приложенная нагрузка, но и условия, предшествующие разрушению, или генетическая или прошлая история напряжений самой почвы.

Изучение условий до разрушения включает ползучесть, прогрессирующее разрушение, напряжение–смягчение–упрочнение и изменения объема. В большинстве исследований характеристики предаварийных условий основаны только на механической энергии (нагрузке). К сожалению, во многих реальных случаях предаварийное поведение контролируется или подвергается воздействию полей с несколькими силами.

11.6.2. Связь между условиями перед разрушением и во время разрушения

Рисунок 11.19, являющейся схематической диаграммой, иллюстрирует три основных условия разрушения, когда почва подвергается приложенной нагрузке, а именно: (1) стадия перед разрушением, (2) стадия разрушения и (3) стадия после разрушения. Характеристики каждой стадии контролируются различными энергетическими полями. Условия для разрушения (расстояние cde) и состояния после разрушения (расстояние ef) контролируются механической энергией. Значение R , указанное на рисунке 11.19, называется остаточным напряжением, а $\Delta\sigma$ называется напряжением девиатора. Прочность почвы при разрушении тесно связана с состоянием до разрушения той же почвы. На характеристики точки пика (4) влияет поведение на отрезках ab и bc . Природные явления, связанные с почвой на стадии перед разрушением, сложны. В основном, они включают в себя два этапа.

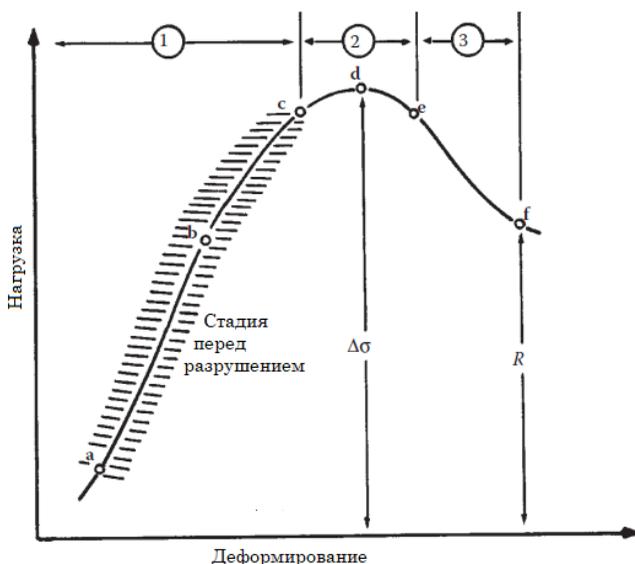


Рисунок 11.19. Схема иллюстрирует три основных условия разрушения, когда почва подвергается приложенной нагрузке (по Fang, H. Y. [1994], Proc. Int. Symp. on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Japan, S. Shibuya, et al., eds. pp. 299–304).

Примечания к рисунку:

- (1) стадия перед разрушением: многоэнергетическое поле;
 - (2) стадия разрушения: механическое энергетическое поле;
 - (3) стадия после разрушения: механическое энергетическое поле;
- расстояние от а до b: контролируется факторами окружающей среды (энергия неск. сред);
 - расстояние от b до с: контролируется факторами окружающей среды или нагрузкой;
 - $\Delta\sigma$ – напряжение девиатора;
 - R – остаточное напряжение.

11.6.2.1. Стадия перед разрушением

(См. расстояние от а до b на рисунке 11.19)

Напряженно-деформированные характеристики почвы на этапе до разрушения контролируются энергиями разных сред. Эти энергии вызваны факторами окружающей среды. Основными факторами являются тепловая, электрическая и электромагнитная энергии.

11.6.2.2. Стадия от нагрузки до разрушения

(См. расстояние от b до с)

Стрессовые и деформационные характеристики почвы связаны как с механическими, так и с энергетическими полями разных сред. По сути, здесь нужно выделить два подэтапа: (1) взаимодействие почвы и воды при различном содержании воды без нагрузки и (2) взаимодействие почвы и воды с нагрузкой. Кроме того, взаимодействие почвы с водой на стадии перед разрушением зависит не только от местной окружающей среды, но и от естественного поведения глинистых минералов. То есть разрушение породы может определяться ее предшествующим состоянием.

11.7. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЧВЫ: НАГРУЗКА, НАПРЯЖЕНИЕ, ПРОЧНОСТЬ

Отношение напряжение–деформация для любого материала используется для анализа устойчивости конструкций. Тем не менее в традиционном подходе стадия разрушения, вытекающая из отношения напряжение–деформация, вызывает беспокойство. Многочисленные математические модели были разработаны для прогнозирования поведения почвы, в том числе упругого, пластического, вязкоупругого, упругопластического, уменьшающего и увеличивающего степень напряжения и деформации. Эти различные предложенные теории, математические модели и их ограничения обсуждались многими исследователями.

11.7.1. Критерии разрушения

Многочисленные критерии разрушения были предложены для анализа устойчивости почвенной массы, но большинство из них заимствованы из базовой

механики. Так как почва представляет собой сложный материал, некоторые ее зависимости от таких параметров, как напряжение, деформация и время, нелинейны. Однако для практического использования обычно применяют линейную модель упругости, критерий Мора–Кулона и уравнение сдвига (уравнение 11.13). В 1925 году Terzaghi показал, что концепция эффективного стресса, включающая влияние давления в поровой воде во время испытаний на сдвиг, изменилась.

$$s = \begin{cases} c + \sigma \tan \phi \\ c' + \sigma' \tan \phi' \end{cases} \quad (11.13)$$

где

S – прочность на сдвиг

c – спаянность

c' – эффективная спаянность

ϕ – угол внутреннего трения

ϕ' – эффективный угол внутреннего трения

σ – нормальное напряжение на плоскости сдвига

σ' – эффективное нормальное напряжение на плоскости сдвига

11.7.2. Типы испытаний на сдвиг

11.7.2.1. Стандартное испытание на сдвиг

Чтобы определить параметры сдвига (c , c' , ϕ и ϕ' в уравнении 11.13), испытания на сдвиг должны проводиться либо в лаборатории, либо в полевых условиях. В настоящее время доступны различные методы испытаний, включая прямой сдвиг, трехосный сдвиг, полый цилиндрический сдвиг и торсионную лопасть. Среди этих методов наиболее часто используются прямой сдвиг (ASTM D3080) и трехосный сдвиг (ASTM D2850). Существует три типа условий нагружения и дренажа, при которых могут проводиться испытания на сдвиг: неконсолидированный недренажный тест (UU- или быстрый тест), консолидированный недренажный тест (CU-тест) и консолидированный дренажный тест (CD- или медленный тест).

Испытание на неограниченное сжатие (ASTM D2166) рассматривается как особый случай неконсолидированного недренированного теста (UU) с ограниченным давлением (σ_3), равным нулю. Девиаторное напряжение ($\Delta\sigma$) при разрушении называется неограниченной прочностью на сжатие и обозначается как q_u . Для мягкой глины, когда угол внутреннего трения мал или равен нулю ($\phi = 0$), прочность на сдвиг (S) или когезия (c) равна половине неограниченной прочности на сжатие (q_u) или $S = c = 1/2 q_u$.

11.7.2.2. Определение необработанных сдвиговых параметров из q_u и σ_1

Параметры неконсолидированного недренированного (UU) сдвига, когезия, c и угол внутреннего трения ϕ обычно определяются с помощью испытаний на трехосный и прямой сдвиг. Эти методы испытаний, как правило, занимают много времени, дороги и особенно плохо подходят для испытаний стабилизированного материала из-за большого размера частиц и высокой прочности. Это часто требует использования больших испытательных образцов, что приводит к

необходимости большего испытательного оборудования и более высоких испытательных нагрузок. Простой способ преодоления этих трудностей предложили Fang и Hirst (1973). Предложенный метод определения этих параметров сдвига (c и ϕ) для грунтов и стабилизированных материалов требует знания только неограниченной прочности на сжатие (q_u) и прочности на растяжение (σ_t).

Описанный здесь метод основан на модифицированной огибающей Мора–Кулона, которую предложили Chen и Drucker (1969). Чтобы установить огибающую разрушения, необходимо указать не менее трех точек этой огибающей. Одна точка определяется из испытаний на растяжение, как описано в разделе 6.7. Вторая точка определяется из теста неограниченного сжатия. Эта информация предоставляет две из трех точек, необходимых для определения огибающей разрушения. Экспериментальные данные показывают, что когезия связана с пределом прочности материала на растяжение σ_t . В таком случае:

$$c = \frac{\sigma_t}{\xi} \quad (11.14)$$

Если почва находится в сухом состоянии, ξ относительно постоянна. Для горных пород это отношение в два раза превышает предел прочности. Для большинства почв это значение варьируется от 2,0 до 5,0. Испытания на неограниченное сжатие и растяжение просты в выполнении. Никакого дополнительного оборудования не требуется, и испытания могут быть удобно выполнены в сочетании с обычными испытаниями CBR и уплотнением.

11.7.3. Факторы, влияющие на прочность на сдвиг

11.7.3.1. Температура и концентрация электролита

Влияние температуры и тепла на прочность на сдвиг обсуждается в разделе 8.6. В этом разделе представлены комбинированные воздействия температуры и электролита на сдвиг. Skempton и Northey (1952) сообщили об исследовании прочности на сдвиг при растяжении в результате выщелачивания. Было обнаружено, что высокие значения чувствительности могут быть получены только с образцами, которые первоначально были получены из глинисто-водных суспензий с высокой концентрацией соли в этом положении, а затем выщелочены. Было обнаружено, что сильно переуплотненные глины и пресноводные озерные глины проявляют чувствительность в диапазоне от низкого до среднего. Высокая чувствительность была обнаружена только в морских глинах, которые свидетельствуют о последующем выщелачивании и снижении концентрации соли.

Leonards и Andersland (1960) представляют тесты на прочность на сдвиг, оценивающие влияние температуры и концентрации электролита, которые дали результаты, противоречащие предсказаниям теории Гуи–Чепмена. Увеличение концентрации соли согласно коллоидной теории уменьшает толщину двойного слоя, тем самым уменьшая силу отталкивания между частицами. Это должно привести к более флокулированной глинистой структуре и, следовательно, к более высокой прочности на сдвиг. По мере того как концентрация соли увеличивалась, прочность без жидкости уменьшалась, как показано на рисунке 11.20.



Рисунок 11.20. Влияние концентрации соли на недренированную прочность на сдвиг (по Leonards, G. A. and Andersland, O. B. [1960], Proc. ASCE Research Conf. on the Shear Strength of Cohesive Soils, pp. 793–818).

11.7.3.2. Загрязненные поры

Влияние промышленных и опасных или токсичных отходов на геотехнические свойства почв изучили Evans и соавторы (1983) для различных типов почв. Также ученые занимались влиянием органических жидкостей на прочность, деформацию и проницаемость почвенно-бентонитовых смесей (1985). Naik (1986) изучал влияние поровой жидкости, используя различные растворы pH, смешанные с лабораторно приготовленным материалом глинистого вкладыша (смесь песка и бентонита). Типичный результат показан на рисунке 11.21.

11.7.3.3. Ионообменная реакция

Vees и Winterkorn (1967) представляют два вида лабораторных испытаний на сдвиг, оба предусматривают реакции ионообмена.

11.7.3.3.1. Испытания систем в равновесии с нормальным давлением

На рисунке 11.22 показано сопротивление сдвигу гомоионных модификаций каолинита и аттапульгита в зависимости от нормального давления, которое также является консолидированным давлением. Влияние обменных ионов на сопротивление сдвигу для аттапульгита выгдит следующим образом: Al > Ca > Na. Следовательно, это связано со степенью упругости, приданной кристаллам, а не со степенью взаимодействия с водой, которая могла бы дать обратную последовательность. В случае каолинита последовательность является такой: Th > Al = Na > Ca. Это также указывает на преобладающее влияние тенденции к формированию хлопьевидных структур.

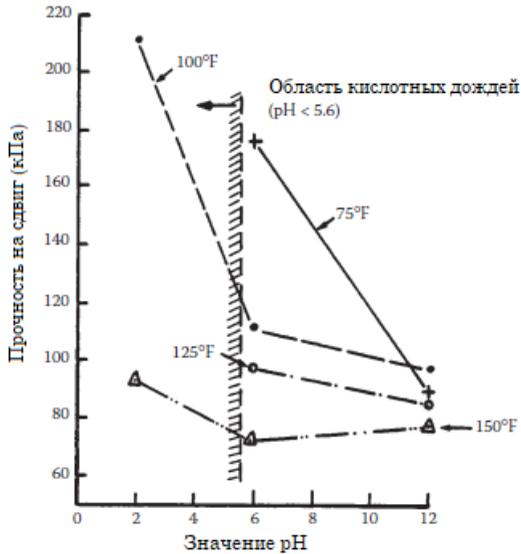


Рисунок 11.21. Влияние значения pH и температуры на прочность на сдвиг песчано-бentonитовой смеси (по Naik, D. [1986], Proc. 1st Int. Symp. Environ. Geotechnol., v. 1, pp. 382–390. Перепечатано с разрешения Envo Publishing, Bethlehem, PA).

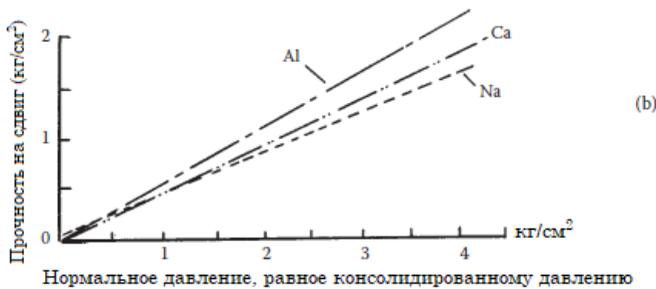
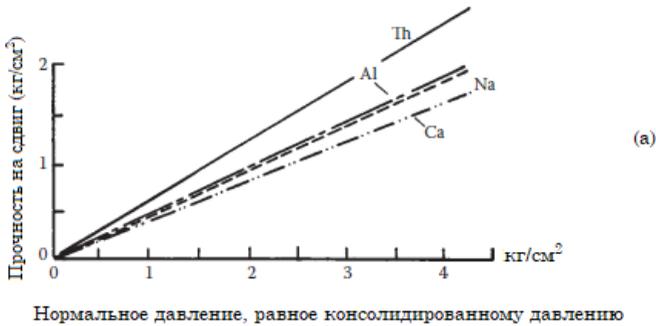


Рисунок 11.22. Сопротивление сдвигу образцов гомоинонного каолинита и аттапульгита в зависимости от нормального давления: (а) каолинит и (b) аттапульгит (по Veels, E. and

Winterkorn, H. F. [1967], Engineering Properties of Several Pure Clays as Functions of Mineral Type, Exchange Ions and Phase Composition, HRR no. 209, pp. 55–65. Этот материал является собственностью Правительство США, но находится в свободном доступе и не подлежит защите авторских прав).

На рисунке 11.23а показаны те же данные о сдвиге для каолинита в зависимости от соотношений пустот, достигнутых при соответствующих уплотняющих давлениях. На этот раз логарифм прочности на сдвиг увеличивается линейно с уменьшением доли пустот. При низких соотношениях пустот структурное влияние наиболее эффективно, о чем свидетельствует порядок катионного эффекта: $Th > Na > Al > Ca$. С увеличением доли пустот эффект Th-иона быстро уменьшается и падает ниже, чем у Na и Al при соотношении пустот 1,4 и 1,45 соответственно.

На рисунке 11.23b показана соответствующая картина для аттапульгита. Из-за преобладающего влияния упругости системы аттапульгита три кривые более тесно сгруппированы вместе. При низких отношениях пустот последовательность катионного эффекта такая: $Al > Ca > Na$; но при высоких отношениях пустот последовательности будут совсем другими.

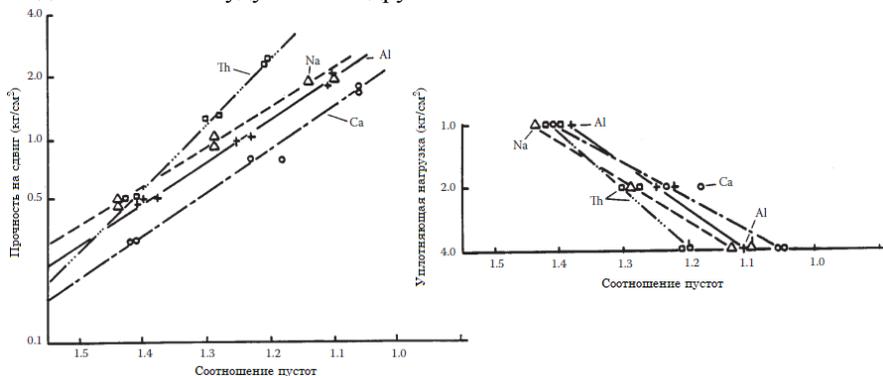


Рисунок 11.23а. Сопротивление сдвигу гомоионных почв как функция соотношения пустот: каолиновая глина (по Veess, E. and Winterkorn, H. F. [1967], Engineering Properties of Several Pure Clays as Functions of Mineral Type, Exchange Ions and Phase Composition, HRR no. 209, pp. 55–65. Этот материал является собственностью Правительство США, но находится в свободном доступе и не подлежит защите авторских прав).

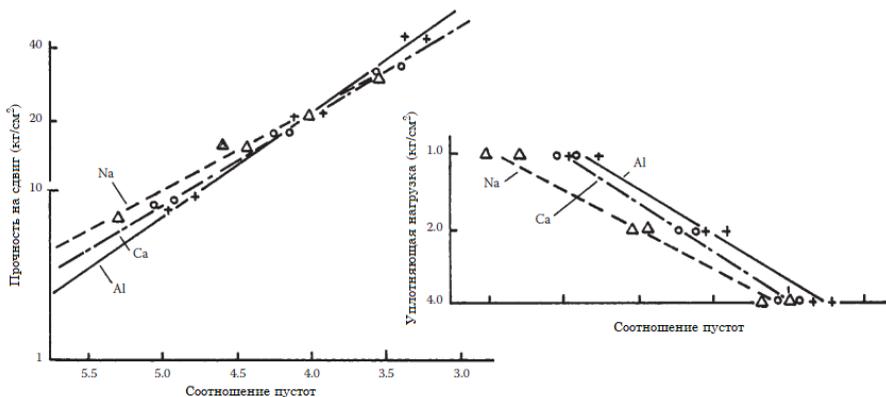


Рисунок 11.23в. Сопротивление сдвигу гомоионных почв как функция соотношения пустот: аттапульгитовая глина (по Veess, E. and Winterkorn, H. F. [1967], Engineering Properties of Several Pure Clays as Functions of Mineral Type, Exchange Ions and Phase Composition, HRR no. 209, pp. 55–65. Этот материал является собственностью Правительство США, но находится в свободном доступе и не подлежит защите авторских прав).

11.7.3.3.2 Испытания образцов, предварительно уплотненных при нормальных давлениях

Испытания образцов, предварительно уплотненных при нормальных давлениях 4 кг/см^2 и сдвигаемых при нормальных давлениях $0,5, 1$ и 2 кг/см^2 , показаны на рисунке 11.24а. Для каолинита данные показывают последовательность катионного эффекта при высоких нормальных давлениях, аналогичных первичным кривым на рисунке 11.22. Однако в случае аттапульгита последовательность переворачивается. Из-за этого и того факта, что данные показали большую зависимость от давления, чем можно было ожидать для быстрых испытаний на ранее переуплотненных образцах, отношения пустот образцов были рассчитаны на основе содержания влаги, определенного после испытания. На рисунке 11.24в показаны те же самые данные о сдвиге для графиков данных прочности на сдвиг в зависимости от соотношений пустот, полученных при этом, пересчитанных из фактического содержания воды во время испытаний. Для каолинита последовательность катионного эффекта была при низких отношениях пустот такой же, как и для исходных образцов; тем не менее величина сопротивления сдвигу была на более низком уровне, чем рисунок 11.23.

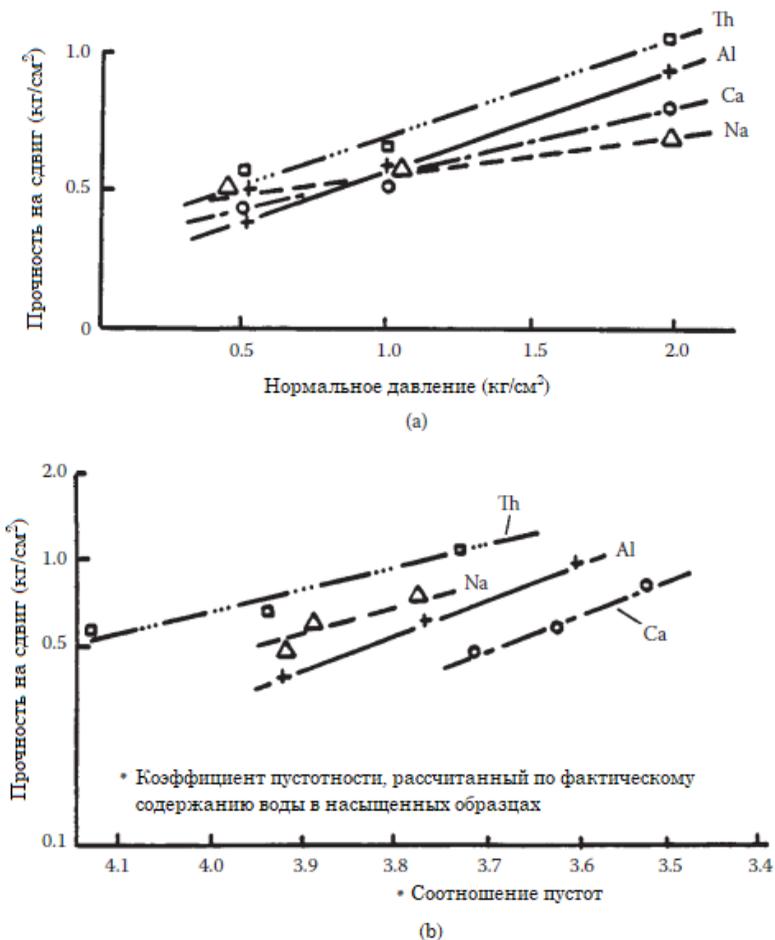


Рисунок 11.24. Сопротивление сдвигу образцов сверхконсолидированного гомоинного каолинита: (а) функция нормального давления и (б) функция отношения пустот (по Veess, E. and Winterkorn, H. F. [1967], Engineering Properties of Several Pure Clays as Functions of Mineral Type, Exchange Ions and Phase Composition, HRR no. 209, pp. 55–65. Этот материал является собственностью Правительство США, но находится в свободном доступе и не подлежит защите авторских прав).

Это может быть связано с упорядочивающим эффектом чрезмерной консолидации. Очевидно, что чрезмерная консолидация оказала свое влияние на структуру почвы, что отражено в данных, касающихся прочности на сдвиг. Аналогичные выводы приведены для образцов аттапульгита.

11.7.4. Чувствительность, ползучесть и уменьшение напряжения почвы

11.7.4.1. Чувствительность

Большинство глин теряют часть своей прочности при повторной обработке, как говорилось в разделе 5.12. Чтобы измерить это явление, был введен термин чувствительность (Terzaghi, 1943). Winterkorn и Tschebotarioff (1947), основываясь на физико-химических концепциях, попытались объяснить возможные причины этого явления. Чувствительность, используемая в геотехнологии, представляет собой отношение прочности при ненарушенной структуре к прочности на разрыв. Для большинства глин регистрируются диапазоны от 2 до 4, для торфа – от 1,5 до 10, а для морских отложений – от 1,6 до 26. С точки зрения их чувствительности к припайке, глины могут быть классифицированы на основе степени чувствительности, как предлагали Skempton and Northey (1952), их концепцию чуть позже модифицировал Vjeggum (1954). Значение чувствительности менее 2,0 означает нечувствительность, а значение от 4 до 8 классифицирует материал как чувствительный. Значение между 16 и 32 классифицируется как очень чувствительное.

Для измерения прочности (как при ненарушенной структуре, так прочности на разрыв) обычно используется неограниченная прочность на сжатие (уравнение 11.15). Поскольку неограниченная прочность на сжатие недостаточно чувствительна при работе с окружающей средой, как обсуждалось в разделе 5.12, было предложено использовать прочность на растяжение в качестве индикатора для оценки чувствительности мелкозернистой почвы (уравнение 11.16). Чувствительность, основанная на прочности на разрыв в зависимости от типа почвы, отраженная индексом пластичности (PI), показана на рисунке 11.25. Другие характеристики прочности на разрыв обсуждались в разделе 6.7.

$$S = q_u [1]/q_u [2] \quad (11.15)$$

$$S' = \sigma_t [1]/\sigma_t [2] \quad (11.16)$$

где

S – чувствительность

S' – чувствительность (которая предполагается)

$q_u [1]$ – неограниченная прочность на сжатие в невозмущенном состоянии

$q_u [2]$ – неограниченная прочность на сжатие в повторном состоянии

$\sigma_t [1]$ – прочность на разрыв в сухом состоянии

$\sigma_t [2]$ – предел прочности при оптимальном содержании влаги (ОМС).

11.7.4.2. Влияние времени на поведение почвы

Различные отложения демонстрируют различное количество зависящих от времени деформаций и изменений напряжения со временем. Этот эффект может привести к увеличению или уменьшению прочности на сдвиг (S_u) по сравнению с поведением при стандартной скорости деформации ($\dot{\epsilon}$), равной 1 %/ч. Результат

такого поведения принимает форму увеличения или уменьшения модуля и прочности грунта, вторичного сжатия, ползучести и релаксации напряжений.

$$\frac{S_u}{S_u \cdot at \cdot \dot{\epsilon} = 1\%/ч} = 1.00 + 0.10 \text{ Log } \hat{\epsilon} \quad (11.17)$$

Соотношение, описывающее это поведение, основанное на работах Casagrande и Wilson (1951), представлено в уравнении 11.17. Кроме того, деформация глин при постоянном напряжении обычно приводит к увеличению жесткости, о чем свидетельствует применение дополнительного напряжения. Это увеличение жесткости является результатом ползучести.

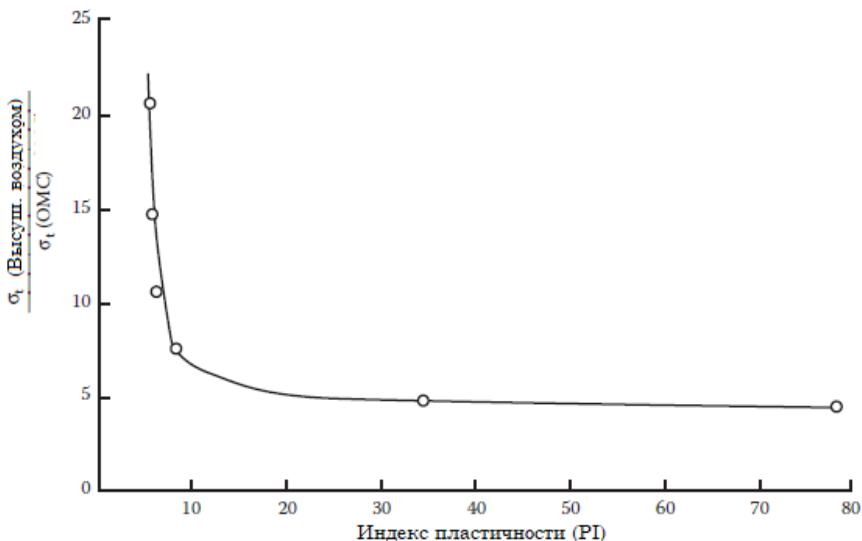


Рисунок 11.25. Отношение σ_t (высушена воздухом) / σ_t (ОМС) к индексу пластичности (данные из: Fang, H. Y. and Fernandez, J. [1981], ASTM STP 740, pp. 130–144).

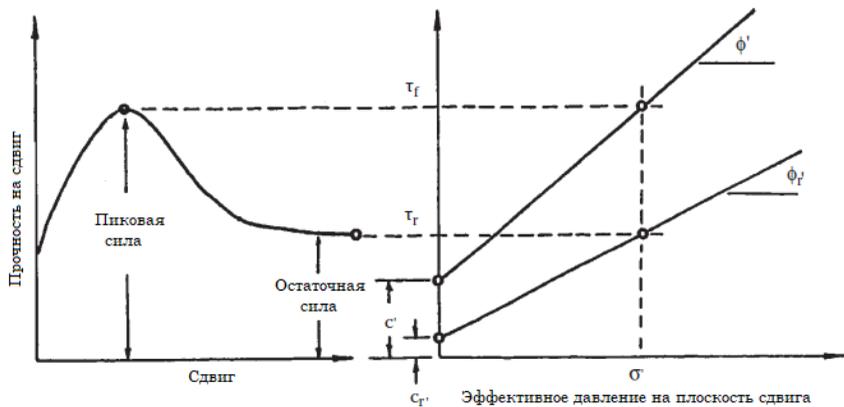


Рисунок 11.26. Концепция остаточной прочности на сдвиг.

11.7.4.3. Поведение ползучести

11.7.4.3.1. Введение

Ползучесть – это долговременная продолжающаяся деформация из-за условий устойчивого девиаторного напряжения ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$), которое возникает как функция времени после рассеивания избыточных давлений в порах уплотнения. Поэтому поведение ползучести почвы зависит от следующих факторов: тип почвы, ее физические свойства, история напряженно-деформированного состояния и время. Mitchell (1976) указал, что разница между ползучестью и вторичным сжатием заключается в том, что первое относится к «зависящим от времени деформациям сдвига, которые развиваются со скоростью, контролируемой вязкостным сопротивлением структуры почвы». Напротив, «вторичное сжатие включает в себя особый случай объемной деформации, которая следует за первичной консолидацией и скорость которой контролируется вязким сопротивлением скелета почвы, а не гидродинамическим сопротивлением».

Ряд авторов обсуждали поведение глины и песка, зависящее от времени, и аналитические методы, используемые для характеристики их реакции на приложение нагрузки. Частичный список этих авторов следующий: Augustesen и соавторы (2004), Liingaard и соавторы (2004), Vyalov (1986) и Lade и соавторы (2009). Основной момент, который подчеркивают эти авторы, заключается в том, что глина и песок реагируют по-разному в зависимости от времени и нагрузки. Схема, иллюстрирующая это различие, представлена на рисунке 11.27 (Lade и соавторы 2009). Рисунок 11.27а показывает, что скорость деформации оказывает важное влияние на поведение глины в зависимости от напряжения. Если скорость деформации на глине изменяется во время нагрузки, то возникает постоянный эффект в результате общей деформации (рисунок 11.27b). Напротив, различные скорости деформации дают аналогичные кривые напряжения–деформации для песка (рисунок 11.27с). Такое поведение песка было отмечено рядом исследователей: Lade и соавторы (2009), Matsushita и соавторы (1999), Tatsuoka и соавторы (2000, 2002, 2006), Di Benedetto и соавторы (2002), Kuwano и Jardine (2002), AnhDan и соавторы (2006) и Kiyota и Tatsuoka (2006). Если скорость деформации изменяется во время загрузки на песчаном материале, происходят только временные изменения, см. рисунок 11.27d. Дальнейшее обсуждение будет ограничено илами и глинами.

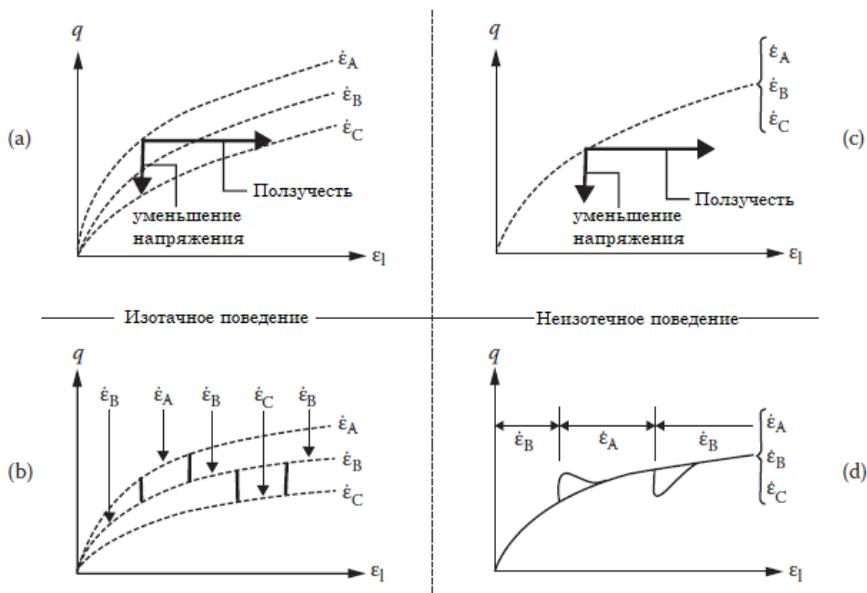


Рисунок 11.27. Поведение изотаха в глине наблюдается для (а) ползучести и уменьшения напряжения и (б) ступенчатого изменения скорости деформации. Поведение неизотаха в песке наблюдается для (с) ползучести и уменьшения напряжения и (д) ступенчатого изменения скорости деформации (по Lade, P. V. et al. [2009.], J. Geotechn. Geoenviron. Eng. ASCE, v. 135, n. 7, 941–963. Reprinted with permission of ASCE).

Чтобы зафиксировать влияние времени на поведение отложений, были проведены испытания на ползучесть при одноосном сжатии на цилиндрических образцах, подверженных постоянному одноосному напряжению. Когда на образец прикладывается ступенчатая нагрузка, он реагирует мгновенной упругой деформацией, сопровождаемой ползучестью. Типичная кривая ползучести (деформация (ϵ) в зависимости от времени), возникающая в результате такой ступенчатой нагрузки, показана на рисунке 11.28а. Эта кривая состоит из трех частей. Часть I является первичной стадией, за которой следует очевидная вторичная стадия II и, наконец, третичная стадия III. Соответствующая кривая зависимости скорости деформации ($\dot{\epsilon}_{\min}$) от времени (t) представлена на рисунке 11.28б. Кривая ползучести отражается в скорости ползучести ($\dot{\epsilon}$). Сначала скорость ползучести ($\dot{\epsilon}$) уменьшается (то есть первичная ползучесть, первичная стадия I), затем она является по существу постоянной (то есть вторичная или устойчивая ползучесть, очевидная вторичная стадия II). Это соответствует минимальной скорости деформации ($\dot{\epsilon}_{\min}$). Далее следует растущая деформация (третичная ползучесть, третичная стадия III), которая в конечном итоге приводит к окончательному разрушению образца. Стационарная часть кривой ползучести обычно сводится к точке перегиба (**m**). При низких уровнях напряжения первичная ползучесть выглядит доминирующей.

На рисунке 11.28с представлена схема влияния возрастающего уровня девиаторного напряжения ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$) на уровень деформации как функцию времени. При увеличении приложенного девиаторного напряжения ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$) предельное напряжение девиаторного напряжения как функция времени увеличивается до тех пор, пока не произойдет разрыв ползучести. Доля общей кривой, которую представляет каждый этап, зависит от ряда факторов. Этими факторами являются: тип материала, уровень напряжения, используемый во время испытания, и в меньшей степени форма образца и условия испытания.

Взаимосвязь между установившейся скоростью ползучести (SSCR) и рядом факторов показана в таблице 11.2. Обзор таблицы 11.2 показывает, что с увеличением PI, процент ползучести и активность SSCR также увеличиваются. В отличие от этого, с увеличением времени для дренированного теста SSCR уменьшается. Для недренированного теста SSCR уменьшается до достижения критического уровня, а затем увеличивается, если отношение напряжения девиатора / начальной силы возрастает по мере увеличения SSCR.

Логарифм скорости осевой деформации (ϵ^*), нанесенный на график как функция логарифма времени (t), уменьшается и является линейным. Такое же поведение наблюдалось для ненарушенной и повторно формованной влажной или сухой глины, обычно уплотненной поверх уплотненной глины и песка (Singh и Mitchell, 1968). В целом, различные типы почв демонстрируют различное количество зависящих от времени деформаций и изменений напряжения со временем. Эти изменения также проявляются как в их вторичном сжатии, так и в характеристиках ползучести.

Величина деформации, которую можно ожидать от данной нагрузки, имеет большое практическое значение. Для оценки степени деформации, которая может возникнуть, обычно проводятся краткосрочные лабораторные испытания для определения свойств ползучести почвы. Значение использования результатов краткосрочного теста для экстраполяции к фактическому времени жизни проекта неизвестно. Ряд математических выражений для описания поведения временной деформации был разработан различными авторами для моделирования лабораторного поведения. Singh (1966) разбил эти различные отношения на три категории. К этим категориям относятся следующие: вязкоупругий (то есть реологический) модельный подход, метод скоростных процессов и эмпирический подход. Далее обсуждение будет ограничено илами и глинами.

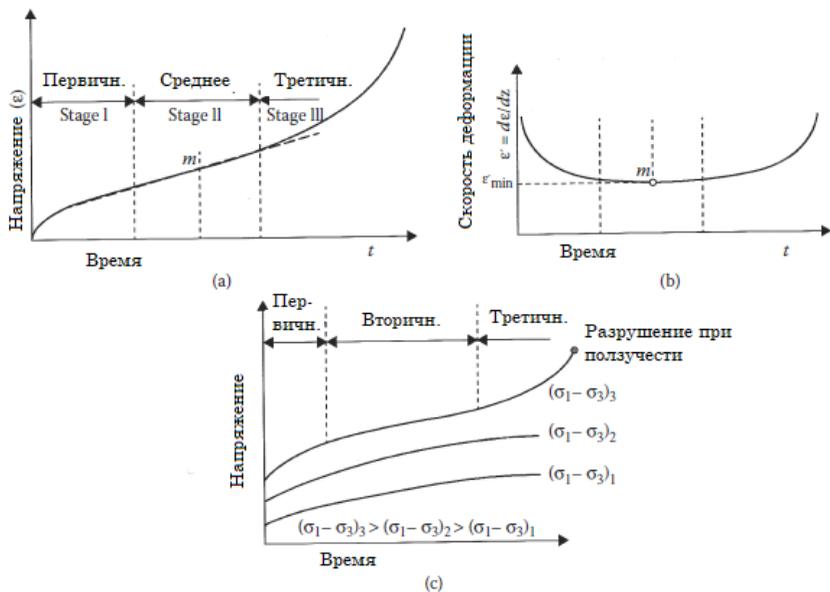


Рисунок 11.28. Напряжение и скорость деформации в зависимости от времени.

Таблица 11.2. Факторы, влияющие на устойчивую скорость ползучести.

Увеличение факторов	SSCR ³
PI	увеличивается
Процент ползучести	увеличивается
Активность	увеличивается
Время ¹	уменьшается
Время ²	уменьшается до критического, затем увеличивается
Девiator напряжений / начальная сила	увеличивается

¹ Дренирован.

² Недренирован.

³ SSCR – устойчивая скорость ползучести (Chaney и Almagor, 2016).

11.7.4.3.2. Вязкоупругий модельный подход

Вязкоупругость – это свойство материалов, которые проявляют как вязкие, так и упругие свойства при деформации. Для моделирования поведения материала вязкоупругость использует пружинные константы (E_1 и E_2), гаситель энергии (вязкость, ν) и ползунки Сен-Венана (скользящий элемент сопротивления τ_0 для учета невосстановимой деформации). Зависящая от времени деформация контролируется ползунковым элементом τ_0 . Следовательно, деформация будет иметь место только для приложенных напряжений, превышающих τ_0 .

Свойства этих элементов могут быть выбраны для охвата широкого диапазона упругого и зависящего от времени вязкого поведения. Вязкоупругие модели

можно разделить как по количеству используемых элементов, так и по тому, находятся ли элементы в последовательном или параллельном расположении. Эти элементы могут быть линейными или нелинейными и объединяться по мере необходимости для модели – для описания поведения исследуемой почвы. Эти модели достаточно хорошо описывают кратковременное поведение, но, как правило, не дают надежных прогнозов деформации в течение продолжительного времени.

Был предложен ряд вязкоупругих (то есть реологических) моделей для моделирования стационарного ползучести в почвах Murayama и Shibata (1964), Schiffman (1959), Christensen и Wu (1964), Singh (1966).

Вязкоупругие модели способны в инженерных целях описывать зависимость времени от деформации почв в течение заданного интервала времени и диапазона приложенных напряжений. В целом, метод не дает правильного математического описания поведения почвы за все время и всех нагрузок.

11.7.4.3.3. Подход к процессу скорости

Зависящее от времени поведение почвы, происходящее во время деформации и разрушения при сдвиге, может быть описано как скорость процесса. Теорию абсолютных скоростей реакции разработали Gladstone и соавторы (1941). Применение этой теории к проблеме ползучести почв изучалось рядом авторов: Murayama и Shibata (1964), Christensen и Wu (1964), Mitchell (1964), Митчелл и соавторы (1968), Keedwell (1984), Feda (1989) и Kuhn и Mitchell (1992).

Теория процесса скорости основана на предположении, что частицы, участвующие в зависимом от времени в процессе деформации, ограничены в движении относительно друг друга. Под сдерживанием обычно понимают количество потенциальной энергии (то есть дифференциальной высоты, сцепления, трения и т. д.), которое должно быть израсходовано до того, как может произойти смещение. Следовательно, для элемента в равновесии, который находится в точке *A*, чтобы сместиться в точку *B*, требуется энергия / работа (то есть энергия активации) ΔF , которая должна быть израсходована. Чтобы продолжить это движение, необходимо преодолеть следующий барьер (то есть количество потенциальной энергии, которая должна быть израсходована). Количество требуемой энергии ΔF может включать один из трех отдельных случаев: (1) ΔF остается неизменным, (2) ΔF увеличивается или (3) ΔF уменьшается. В почвах обычно считается, что ΔF остается постоянным.

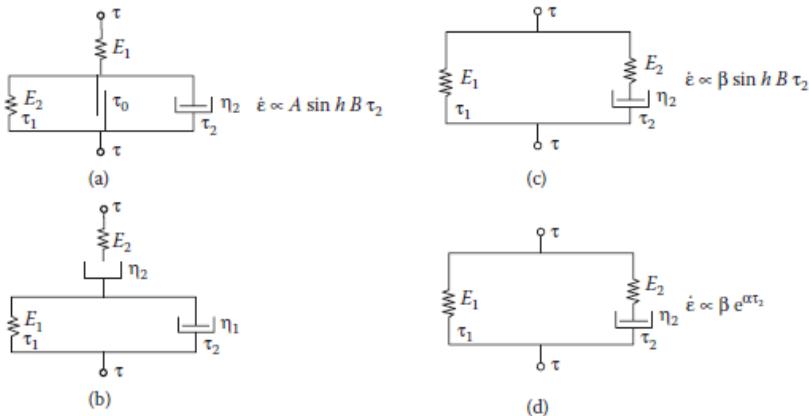


Рисунок 11.29. Вязкоупругие модели для имитации ползучести почвы. Уравнения справа от модели описывают поведение гасителя энергии (a) Murayama и Shibata (1964); (b) Schiffman (1959); (c) Christensen и Wu (1964); (d) Singh (1966). (По Hirst, T. J. [1968], The influence of compositional factors on the stress–strain–time behavior of soils, PhD. Univ. of California-Berkeley.)

Следующее уравнение для описания скорости деформации (ϵ') почв в любой момент времени представил Hirst (1968):

$$\epsilon' = 2X \frac{kT}{h} \exp\left(\frac{-\Delta F}{RT}\right) \sin h\left(\frac{f\lambda}{2kT}\right) \quad (11.18)$$

где:

ϵ' – скорость деформации в любой момент времени t

X – постоянная в зависимости от структуры почвы в момент времени t

k – постоянная Больцмана

h – постоянная Планка

R – газовая постоянная

T – абсолютная температура

f – средняя сила сдвига, действующая на каждую межчастичную связь

λ – среднее расстояние между последовательными положениями равновесия в зоне межчастичного контакта

ΔF – свободная энергия активации.

Mitchell (1993) указывает, что нет строгого доказательства формулировки статистической механики теории процессов скорости, но тем не менее уравнение описывает поведение многих реальных систем.

11.7.4.3.4. Эмпирический подход

Эмпирический подход – это третий подход, используемый для описания зависящих от времени деформаций в почвах. Этот подход включает моделирование поведения материала в контролируемых условиях. Предпринимаются попытки разработать математические отношения между

параметрами системы, чтобы получить уравнения, которые описывают и предсказывают поведение материала.

Изменение скорости осевой деформации ползучести в зависимости от времени представлено на рисунке 11.30. Он показывает, что для уровня напряжения (SL), меньшего или равного 0,83, соотношение $\log \dot{\epsilon}_a$ и $\log t$ является линейным. Уровень напряжения (SL) определяется как отношение наложенного девиаторного напряжения / девиаторного напряжения при разрушении в обычном трехосном тесте. Ряд авторов (Singh и Mitchell, 1968; Vaid и Campanella, 1977; Tavenas и соавторы, 1978; Zhu и соавторы, 1999) показали, что для низких SL линии на рисунке 11.30 почти параллельны для испытаний на ползучесть. Это указывает на то, что наклон линий (m) является постоянным. При внимательном рассмотрении рисунка 11.30 становится ясно, что отдельные линии пересекаются примерно через 10 минут, но имеют разные наклоны. Обзор рисунка 11.30 показывает, что чем меньше SL, тем больше значение m . На рисунке 11.31 представлен схематический график зависимости $\text{Log } \dot{\epsilon}_a$ от основной разности напряжений (D) как функции времени. Рисунок 11.31 показывает, что в момент времени $t = 1$ мин. после начала сползания наклон линейной части кривой может быть спроецирован обратно на ось ординат, что дает значение для параметра A . Скорость деформации на основе кривых на рисунке 6.4 представили Singh и Mitchell (1968) в уравнении 11.19:

$$\dot{\epsilon}_a = A e^{\alpha q} \left(\frac{t_1}{t} \right)^m \quad (11.19)$$

где A , α и m – параметры материала
 q – девиаторное напряжение
 t – единичное время (то есть 1 минута)

Показано, что параметры α , m являются функциями текущей истории напряжения. Это основано на поведении ползучести от многоступенчатого тестирования (Zhu и соавторы, 1999). Показано, что параметр A является функцией типа глины (Hirst и Mitchell, 1968).

Интегрирующее уравнение 11.19 описывает деформацию (ϵ). Это уравнение предсказывает одноосное поведение ползучести как для дренированных, так и для недренированных условий. Для определения значений параметров A , m и α требуется минимум два теста на ползучесть.

$$\epsilon = \frac{A t_1}{(1-m)} e^{\alpha D} \left(\frac{t_1}{t} \right)^{(1-m)} \quad (11.20)$$

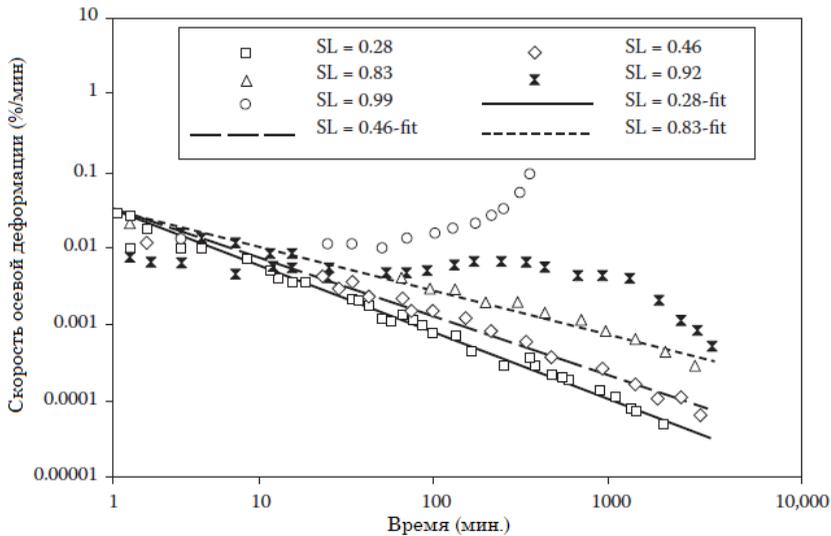


Рисунок 11.30. Логарифм осевой скорости деформации в зависимости от логарифма времени (по Zhu, J.-G., et al. [1999], Geotechn. Test. J. v. 22, pp. 112–120. ASTM, Conshohocken, PA. С разрешения).

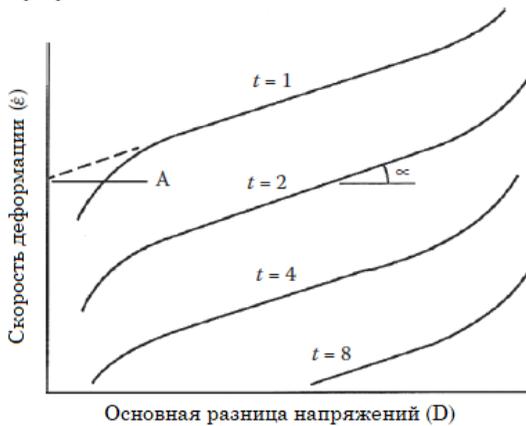


Рисунок 11.31. Графическое сравнение результатов, полученных из различных опубликованных уравнений.

11.7.4.4. Снятие напряжений

В отличие от ползучести снятие напряжения (релаксация) – это длительное снижение прочности, которое происходит как функция времени при устойчивом уровне напряжения. Те же самые общие свойства материала, которые влияют на ползучесть материала, будут влиять на его релаксацию. Как ползучесть, так и релаксация важны для оценки долгосрочного поведения почвы, особенно для загрязненной мелкозернистой почвы. К сожалению, очень мало экспериментальных данных доступно по этому аспекту.

11.8. Остаточная прочность на сдвиг

11.8.1. Характеристики остаточной прочности на сдвиг

11.8.1.1. Общее обсуждение

Для анализа характеристик сдвига переуплотненного грунта, связанных с проблемами устойчивости, обычные испытания на сдвиг не подходят, поскольку они дают слишком высокое значение сдвига. Skempton (1964) показал, что прочность, остающаяся в лабораторных образцах после большого смещающего сдвига, хорошо соответствует расчетной прочности от реальных оползней; поэтому он предложил концепцию *остаточной прочности*, отраженную на рисунке 11.26, для анализа устойчивости склона переуплотненных глин:

$$S_r = \sigma' \tan \phi_r \quad (11.21)$$

где

S_r – остаточная прочность на сдвиг

σ' – эффективное давление на плоскость сдвига

ϕ_r – остаточный эффективный угол трения

На рисунке 11.26 максимальная прочность τ_f , соответствующий эффективный угол трения ϕ' и эффективная когезия c' используются для традиционного анализа устойчивости склона. Однако для сверхуплотненных глин ϕ_r и c_r предлагаются для анализа наклона. Значение c_r обычно очень мало или равно нулю.

Характеристики остаточной прочности из лабораторных испытаний показывают, что для данного образца почвы, если содержание влаги в пресс-форме одинаково для обоих условий, конечная остаточная прочность для обоих условий остается одинаковой. Остаточная прочность на сдвиг как для сверхконсолидированных, так и для нормально уплотненных глин одинакова, даже несмотря на то, что пиковая прочность и начальное содержание влаги в обоих случаях различны.

11.8.1.2. Методы определения остаточной прочности

Остаточная прочность на сдвиг в уравнении 11.21 может быть получена из испытаний прямого сдвига с медленным дренированием, как предложил Skempton (1964). С тех пор было разработано несколько методов и процедур испытаний, включая модифицированную коробку сдвига, испытание на трехосное сжатие и сдвиг кольца. Среди этих методов наиболее эффективен кольцевой сдвиг (Bishop и соавторы, 1971). Существуют различные типы кольцевого сдвига, такие как русский кольцевой сдвиг (CRRI, 1976), кольцевой сдвиг CRRI (CRRI, 1976) и другие. Так как каждое испытательное устройство и методика испытаний различны, о некоторых расхождениях или вариациях пишут Townsend и Gilbert (1973), CRRI (1976, 1979) и другие.

11.8.2. Данные об интерпретации остаточного сопротивления

Townsend и Gilbert (1973) суммируют остаточное сопротивление сдвигу глинистых сланцев с пяти участков плотины (таблица 11.3), включая Техас, Монтану и Южную Дакоту. Используются три типа методов испытаний, в том числе угловой сдвиг, повторный прямой сдвиг и вращательный сдвиг.

Эффективное давление ϕ' вдоль плоскости сдвига варьировалось от 1,5 до 12 кг/см². Результаты эффективного угла остаточного трения (ϕ_r') показывают, что между этими методами нет существенных различий. Сравнение данных об остаточной прочности проводилось в рамках трех лабораторных испытаний (CRRI, 1976, 1979), включая повторный прямой сдвиг, трехосное сжатие и кольцевой сдвиг. При этом использовались четыре типа почвы. Для всех случаев результаты кольцевого сдвига дают более высокие остаточные углы трения. Скорость сдвига для определения остаточной прочности была изучена с помощью CRRI. Указывается, что чем меньше скорость сдвига, тем выше остаточный угол трения (ϕ_r). Скорость сдвига изменяется от 0,08 до 0,12 мм/мин, а ϕ_r – от 3° 36' до 7° 31'. Резиновая мембрана, используемая в трехосном устройстве для определения остаточной прочности, также имеет некоторое значение. По мере увеличения бокового давления значения коррекции для резиновой мембраны увеличиваются. В таблице 11.4 представлено сравнение результатов натуральных и лабораторных испытаний для определения параметров остаточной прочности. Влияние окружающей среды на остаточную прочность на сдвиг были изучены. Влияние коллоидного, глинистого минерального состава и химических веществ в почве оказывает существенное влияние на остаточную прочность на сдвиг (Kenney, 1967).

Таблица 11.3. Остаточное сопротивление сдвигу глинистых сланцев, определенное с помощью кольцевого сдвига, повторного прямого сдвига и вращательного сдвига.

Сланец	ϕ' (кг/см ²)	Остаточное сопротивление сдвигу, ϕ_r		
		ϕ_r' (кг/см ²)	Повторный прямой сдвиг (град)	Вращательный сдвиг (град)
Тейлор I (Лейнпорт Дэм, Техас)	6,0	10,6 (ϕ_r не достигнуто)	9,6	9,8
	12,0	10,8	10,3	
	3,0	8,6		
	1,5	8,3		
	6,0	8,7	9,3	7,2
Строун (Проктор Дэм, Техас)	12,0	9,5	9,9	
	3,0	9,3		
	1,5	9,4		
Кинкейд (Купер Дэм, Техас)	3,0	4,7		
	6,0	4,8	5,5	Материал слишком грубый для проведения теста
	12,0	5,5	5,3	
	3,0	5,6		
	1,5	5,5		
Медвежья лапа (Форт Пек Дэм, Монтана)	6,0	6,9	6,3	6,4
	12,0	6,7	6,2	
	3,0	7,2		
	1,5	8,1		
Пьер (Oahe Dam, SD)	6,0	3,0	3,0	3,1
	12,0	3,6	3,3	
	6,0	3,5		
	3,0	3,1		

Источник: по Townsend, F. C. and Gilbert, P. A. (1973), *Geotechnique*, v. 23, n. 2, pp. 267–271.

11.8.3. Отношение остаточного сопротивления к другим параметрам почвы

Поскольку пиковые или остаточные параметры сдвига являются относительно трудоемкими для определения и дорогостоящими, для практического использования некоторые исследователи предложили простые экспериментальные уравнения и корреляции – для оценки этих параметров прочности, которые обобщаются следующим образом.

Таблица 11.4. Сравнение *in situ* и лабораторных методов испытаний для определения параметров остаточного сопротивления.

1		2		3		4	
C_r (кг/см ²)	ϕ_r						
0,07	2°34'	0,10	2°00'	0,09	2°20'	0,03	3°00'
0,08	3°12'	0,18	3°06'	0,09	3°14'	0,07	3°00'
0,12	3°18'	0,09	4°50'	0,12	2°20'	—	—

Примечание: (1) на естественной поверхности скольжения; (2) лабораторный повторный прямой тест на сдвиг; (3) измерение сдвига *in situ* на большой поверхности сдвига; (4) обратный расчет.

Источник: по CRRI (1976, 1979), Сборник статей по оползням, ст. 1 и 2, Китайский исследовательский институт железных дорог, Ланьчжоу, Китай.

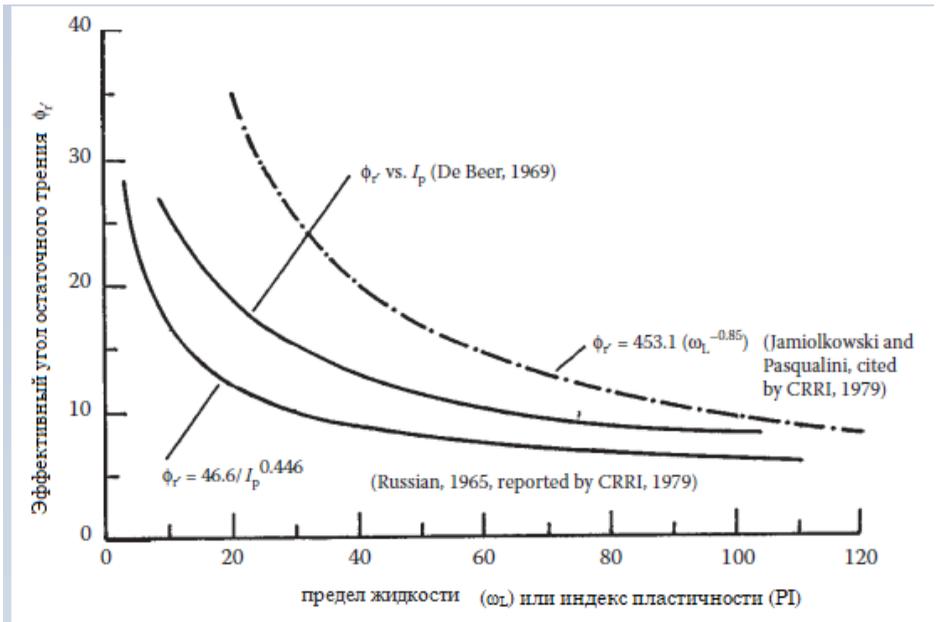


Рисунок 11.32. Эффективный угол остаточного трения (ϕ_r) в зависимости от предела жидкости и индекса пластичности (PI).

11.8.3.1. Корреляция с содержанием глины и пределами Аттерберга

11.8.3.1.1. Глинистость

Skempton (1964) показывает предельное значение ϕ , которое связано с содержанием глины (< 2 мкм) для различных типов почв в Англии. De Beer (1969) представил простую связь между эффективным углом остаточного трения ϕ_r и индексом пластичности (PI), как показано на рисунке 11.32.

11.8.3.1.2. Верхний предел пластичности

Уравнение 11.15, предложенное Jamiolkowski и Pasqualini, цитируемое CRRI (1979), основано на выветривании синих и серых глин в Италии. Коэффициент корреляции r^2 для уравнения равен 0,76.

$$\phi_r = 453.1 (LL^{-0.85}) \quad (11.22)$$

где

ϕ_r – эффективный угол остаточного трения

LL – верхний предел пластичности

11.8.3.1.3. Индекс пластичности

Уравнение 11.23 было предложено русским инженером в 1965 году, как сообщил CRRI (1979). На рисунке 11.32 для сравнения представлены графические формы различных уравнений:

$$\phi_r = 46.6/PI^{0.446} \quad (11.23)$$

где PI – индекс пластичности

11.8.3.2. Корреляция с индексом ликвидности (LI)

11.8.3.2.1. Остаточная спаянность

Корреляция остаточной спаянности (c_r) с индексом пластичности (LI) и верхним пределом пластичности (LL) представлена в таблице 11.5. Для данного индекса пластичности значение c_r увеличивается с увеличением верхнего предела пластичности.

11.8.3.2.2. Остаточный угол трения

Уравнение 11.24, предложенное CRRI (1979), было основано на 236 лабораторных испытаниях (многократные испытания на сдвиг без повторного натяжения) и 59 полевых наблюдениях за 91 типом скользящих почв. Дальнейшие обсуждения по этому аспекту будут представлены в разделе 16.6. При рассмотрении уравнения 11.24 становится понятно, что индекс пластичности больше влияет на остаточное напряжение сдвига, чем на другие параметры.

$$\text{Log } \phi_r = 2.4278 - 1.2279 \text{ Log LI} - 0.1173 \text{ Log LI} \quad (11.24)$$

11.8.3.3. Корреляция с приложенным нормальным напряжением

Связь между остаточной прочностью и нормальным напряжением была предложена российским инженером, цитируемым CRRI (1979):

$$\tau_r = 0.09 + 0.14\sigma \quad (11.25)$$

Уравнение 11.25 основано на 200 лабораторных тестах пластичности глины. Коэффициент корреляции r^2 равен 0,78. Уравнение 11.26 представляет собой корреляцию прочности на сдвиг вдоль естественной поверхности скольжения с результатами лабораторных испытаний нормального напряжения σ и остаточной прочности τ_r и выглядит следующим образом:

$$\bar{\tau}_r = 0.06 + \tau_0.15\sigma \quad (11.26)$$

Таблица 11.5. Корреляции остаточной когезии (C_r) с верхним пределом пластичности (ω_L) и индексом пластичности (I_L).

C_r/I_L	Верхний предел пластичности (ω_L ,%)			
	20–30	30–40	40–50	50–60
0–0,1	0,03–0,05	0,13–0,15	0,14–0,15	0,20
0,1–0,2	0,02–0,04	0,08–0,09	0,13–0,14	0,19–0,20
0,2–0,3	0,02–0,03	0,07–0,08	0,12–0,13	0,17–0,18
0,3–0,4	0,01–0,02	0,04–0,05	0,11–0,12	0,12–0,13
>0,4	0–0,01	0,04–0,05	0,08–0,09	0,09–0,11

Источник: по CRRI (1976, 1979), Сборник статей по оползням, ст. 1 и 2, Китайский исследовательский институт железных дорог, Ланьчжоу, Китай.

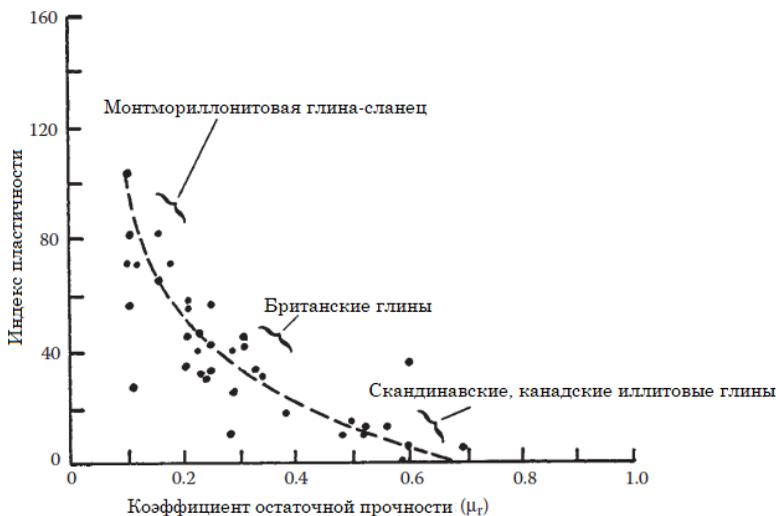


Рисунок 11.33. Индекс пластичности в зависимости от коэффициента остаточного сопротивления (по Voight, B. [1973], *Geotechnique*, v. 23, n. 2, pp. 265–267).

Уравнение 11.19 основано на 50 полевых наблюдениях. Коэффициент корреляции (r^2) равен 0,82. Было обнаружено, что остаточное сопротивление в лаборатории (τ_r) очень близко к силе сдвига в полевых условиях вдоль естественной поверхности скольжения (CRRI, 1979).

11.8.3.4 Корреляция с коэффициентом остаточного сопротивления (μ_r)

Voight (1973) суммировал различные опубликованные данные с 1967 по 1970 год и обнаружил связь между индексом пластичности (PI) и коэффициентом остаточного сопротивления (μ_r), который определяется так:

$$\mu_r = \frac{\tau_f - \bar{\tau}}{\tau_f - \tau_r} \quad (11.27)$$

где

μ_r – коэффициент остаточного сопротивления

τ_f – пиковая прочность (рисунок 11.30)

τ – прочность на сдвиг на естественной поверхности скольжения

τ_r – остаточное сопротивление

Результаты индекса пластичности в зависимости от коэффициента остаточного сопротивления показаны на рисунке 11.33.

11.9. ДИНАМИКА ПОЧВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

11.9.1. Динамический модуль сдвига и коэффициент демпфирования почв

11.9.1.1. Введение

Динамика почвы является частью динамики частиц, как обсуждалось в разделе 2.9. Динамический модуль сдвига и демпфирование почвы являются двумя фундаментальными параметрами почвы, необходимыми для анализа реакции взаимодействия почвы и структуры почвы при динамическом нагружении. Фундаментальные корреляции модуля сдвига, коэффициента демпфирования, напряжения сдвига и деформации сдвига с различными давлениями уплотнения определяются в лабораторных испытаниях на циклический сдвиг. Различные авторы проводят сравнение между результатами лабораторных испытаний, результатами испытаний поперечных скважин на месте и строительными нормами (Seed, 1991; Chaney и Ramakcu, 1991). Пример лабораторных данных о глинах, иле с глинами и песках представлен и обсужден в следующем разделе. Далее следует раздел о моделировании.

11.9.1.2. Результаты эксперимента

Есть две проблемы, которые необходимо решить. Это расчет G_{\max} и изменение G и коэффициента демпфирования (λ) в зависимости от деформации сдвига. G_{\max} можно рассчитать на основе геофизических испытаний, которые дали поперечные волны (типичные деформации сдвига $< 3 \times 10^{-4} \%$), как показано в уравнении 11.28.

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (11.28)$$

где

G_{\max} – модуль сдвига при деформации сдвига менее $3 \times 10^{-4} \%$

ρ – плотность

V_s – скорость поперечной волны

Образец почвы при циклическом нагружении имеет гистерезисную петлю (то есть нагрузка в зависимости от деформации), как показано на рисунке 11.34 для глины из Мексиканского залива. Если образец циклически нагружен в осевом направлении, определяется модуль Юнга. Напротив, если образец нагружен кручением или сдвигом, определяется модуль сдвига. Идеализированное представление основных отношений напряжение–деформация представлено на рисунке 11.35. Модуль сдвига (G) представляет собой наклон прямой линии, соединяющей конечные точки одной петли гистерезиса, а площадь петли является мерой коэффициента демпфирования грунта (λ). Кроме того, на рисунке 11.35а представлена кривая магистрали, G_{\max} и демпфирование. G_{\max} определяется как модуль сдвига при малых деформациях ($\leq 10^{-4} \%$). Этот параметр может быть определен либо с помощью геофизического испытания в полевых условиях, либо с помощью резонансного испытания колонны в лаборатории. Обобщение, описывающее влияние различных факторов на G_{\max} , G/G_{\max} и коэффициент демпфирования (λ), представлено в таблице 6.

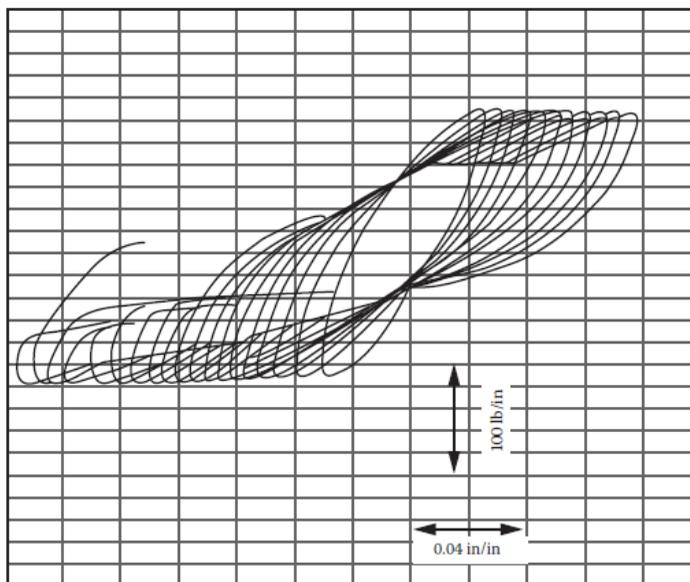


Рисунок 11.34. Петли гистерезиса для глины Мексиканского залива, которая проходит циклическое трехосное испытание (по Chaney, R. C. and Fang, H. Y. [1986], ASTM STP 923, pp. 74–111. С разрешения).

Окончательные результаты экспериментов с шанхайским мягким илом представлены на рисунке 11.35 (Fang и соавторы, 1981) вместе с опубликованными данными. Рисунок 11.35 показывает, что циклический отклик шанхайского ила лежит в области между песком и глинами.

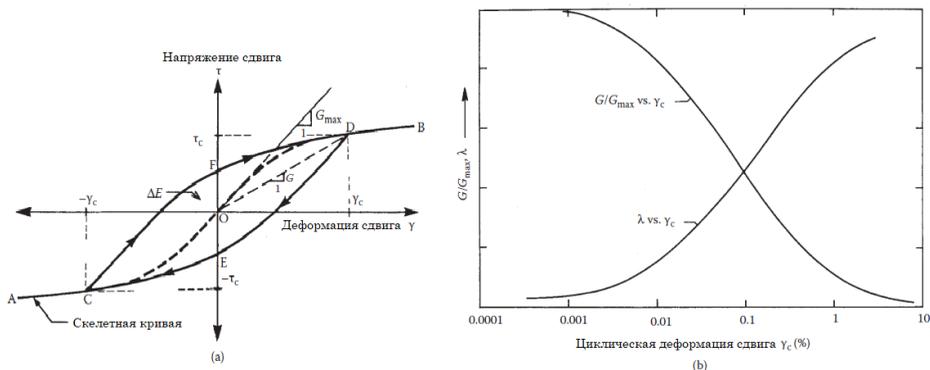


Рисунок 11.35. Напряжение–деформация как основное циклическое отношение (по Vucetic, M. and Dobry, R. J. [1991], *Geotech. Eng.*, v. 117, pp. 89–107. С разрешения).

Таблица 11.6. Влияние увеличения различных факторов на G_{max} , G/G_{max} и коэффициент демпфирования λ нормально уплотненных и умеренно избыточно уплотненных почв.

Усиливающий фактор	G_{max}	G/G_{max}	λ
Ограничивающее давление, σ'_v	Увеличивается с помощью σ'_v	Остается постоянным или увеличивается с помощью σ'_v	Остается постоянным или уменьшается с помощью σ'_v
Коэффициент пористости, e	Уменьшается с e	Увеличивается с e	Уменьшается с e
Геологический возраст, t	Увеличивается с t	Может увеличиваться с t	Уменьшается с t
Цементация, c	Увеличивается с c	Может увеличиваться с c	Может уменьшаться с c
Сверхконсолидация, OCR	Увеличивается с OCR	Не влияет	Не влияет
Индекс пластичности, I_p	Увеличивается с I_p , если $OCR > 1$; остается постоянным, если $OCR = 1$,	Увеличивается с I_p	Уменьшается с I_p
Циклический штамм, γ_c	—	Уменьшается с γ_c	Увеличивается с γ_c
Скорость деформации $\dot{\gamma}$ (частота циклического нагружения)	Увеличивается со скоростью деформации	Увеличение G с $\dot{\gamma}$ G/G_{max} , вероятно, не затронуто, если G и G_{max} измеряются при одном и том же $\dot{\gamma}$	Остается постоянным или может увеличиваться при $\dot{\gamma}$
Количество циклов загрузки, N	Уменьшается после N циклов большого γ_c , но позже восстанавливается	Уменьшается после N циклов больших $\dot{\gamma}$ (G_{max} измеряется до N циклов)	Не значимо для умеренных γ_c и N

Источник: по Dobry, R. and Vucetic, M. (1987), Proc. Int. Symp. on Geotechn. Eng. of Soft Soils 2, ISSMFE, Mexico City, Mexico, pp. 51–87. Перепечатано с разрешения Mladen Vucetic.

Vucetic и Dobry создали серию кривых как для G/G_{\max} , так и для коэффициента демпфирования (λ) как функции деформации (рисунки 11.36 и 11.37).

(1) Если геофизические скорости сдвиговых волн недоступны, то G_{\max} можно получить, используя различные эмпирические уравнения. Значения, полученные с помощью этого уравнения, сравниваются с данными, полученными с помощью эмпирического уравнения, которое первыми предложили Hardin и Black (1968).

$$G_{\max} = 625 F(e) (\text{OCR})^k p_a^{1-n} (\sigma'_m)^n \quad (11.29)$$

где

G_{\max} – максимальный модуль сдвига в тех же единицах, что и P_a и σ'_m

$F(e)$ – функция отношения пустот

$F(e) = 1 / (0,3 + 0,7e^2)$ (Hardin, 1978)

$F(e) = 1 / e^{1,3}$ (Jamiolkowski и соавторы, 1991)

n – составляющая напряжения, обычно 0,5

e – коэффициент пустотности

OCR – коэффициент избыточной консолидации

k – показатель степени переуплотнения, функция индекса пластичности (PI)

Диапазон значений от 0,0 для PI = 0 до 0,5 от PI \geq 100

$m = \sigma'_v (1 + 2K_0 / 3)$ – это среднее эффективное напряжение в тех же единицах, что и G_{\max} и σ'_m

V – вертикальное эффективное напряжение

K_0 – коэффициент давления грунта в состоянии покоя

p_a – атмосферное давление в тех же единицах, что и G_{\max} и σ'_m

Это уравнение было разработано на основе испытаний резонансных колонн на песках, илах и глинах. Продолжительность теста была ограничена одним днем или даже меньше.

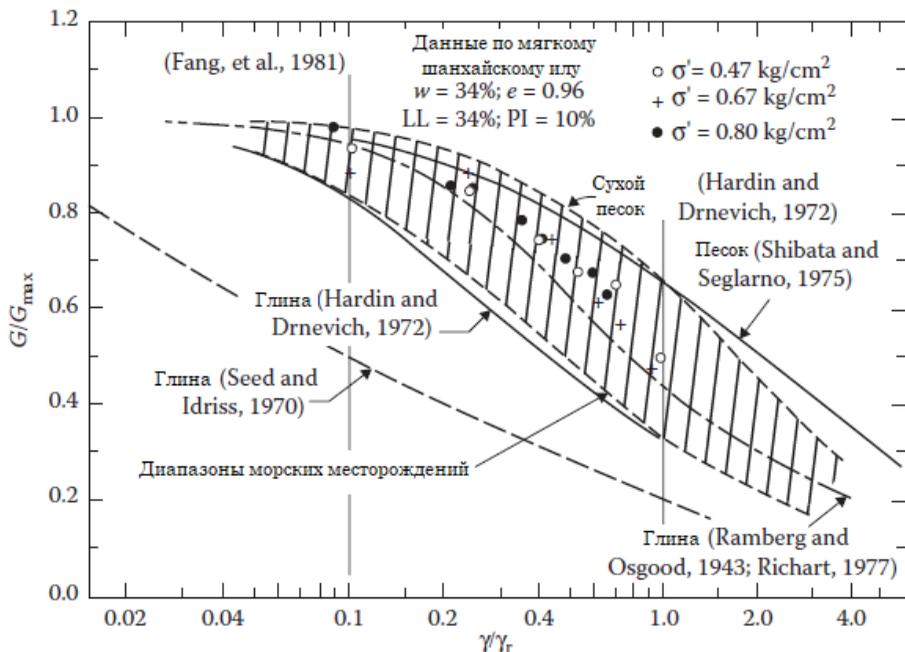


Рисунок 11.36. Сравнение коэффициента динамического модуля сдвига (G/G_{max}) с коэффициентом деформации (γ/γ_r) для различных типов почв и диапазонов морских отложений (данные из: Fang, H. Y. et al. [1981], Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, University of Missouri, Rolla, MO, pp. 575–580).

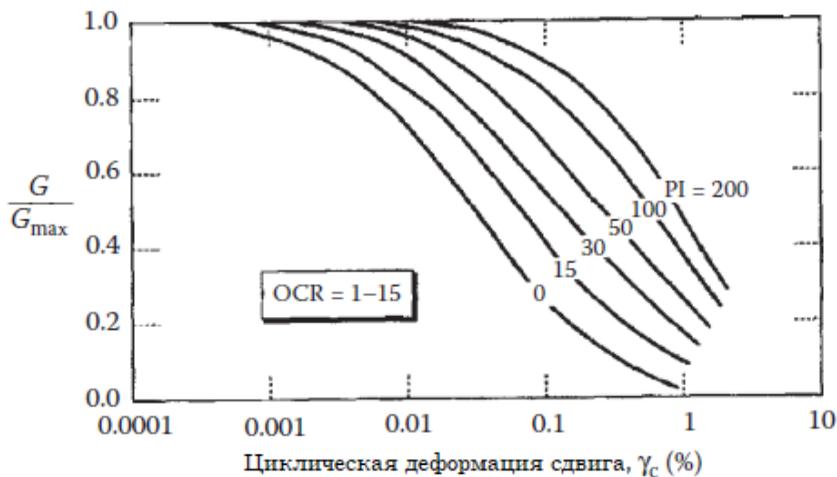


Рисунок 11.37. G/G_{max} как функция циклической деформации сдвига и индекса пластичности (по Vucetic, M. and Dobry, R. J. [1991], Geotechn. Eng., ASC, v. 117, pp. 89–107. С разрешения).

(2) Подход Сиды–Идрисса

Данный подход использует ту же исходную лабораторную базу данных, что и уравнение 11.30.

Уравнение названных ученых представлено далее.

$$G_{\max} = 1000K_{2\max}\bar{\sigma}_m^{0.5} \quad (11.30)$$

где

G_{\max} – максимальный модуль сдвига (psf)

$K_{2\max}$ – эмпирический фактор, который зависит от относительной плотности

$\bar{\sigma}_m$ – среднее эффективное ограничивающее давление (фунт/фут²)

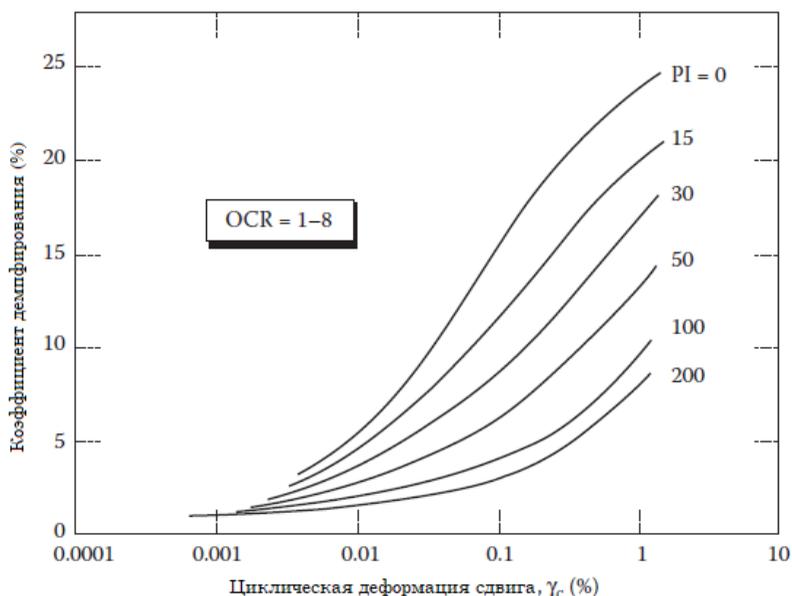


Рисунок 11.38. Коэффициент демпфирования как функция циклической деформации сдвига и индекса пластичности (по Vucetic, M. and Dobry, R. J. [1991], Geotech. Eng., ASC v. 117, pp. 89–107. С разрешения).

Эмпирический коэффициент $K_{2\max}$ первоначально определялся из лабораторных данных, но впоследствии использовались геофизические данные. Значения, основанные на геофизических испытаниях на песке, от рыхлых до плотных отложений, обычно варьировались от 34 до 86. Для цементированного песка $K_{2\max}$ составляет порядка 166, а для глинистого песка 119.

(3) G_{\max} для глин

Для глин было разработано следующее уравнение:

$$\frac{G_{\max}}{S_u} = \psi \quad (11.31)$$

где

S_u – недренированная прочность на сдвиг глины

ψ – константа обычно составляет от 1000 до 3000

4) Оценка модуля сдвига поля по лабораторным значениям. Лабораторные значения G_{\max} обычно недооценивают значения поля G_{\max} , если в данных не учтено долговременное увеличение модуля (Anderson и Stokoe, 1978). Оцененное G_{\max} поле оценивается больше на основе средней скорости увеличения модуля (I_G), чем на возрастном факторе (F_A).

$$G_{\max \text{ field}} = G_{\max \text{ lab}} + F_A * I_G \quad (11.32)$$

$$F_A = \log_{10} \left(\frac{t_c}{t_p} \right) \quad (11.33)$$

где:

t_c – время с момента последнего изменения напряжения

t_p – время для завершения первичной консолидации на площадке в результате изменения напряжения

(5) Корреляция лабораторного модуля сдвига с использованием подхода эталонной деформации.

Для нормально консолидированных почв, таких как мягкая глина, использование подхода «эталонной деформации» для нормализации данных напряжения–деформации дает кривую, которая не зависит от эффективной траектории напряжения и нарушения образца. Следовательно, нормализованная кривая напряжения–деформации, полученная с помощью этого метода, должна применяться к условиям *in situ*. Первая процедура была представлена Hardin и Drnevich (1972), где было показано, что модуль сдвига (G) равен следующему отношению:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{1}{a + \gamma b} \quad (11.34)$$

где

G – динамический модуль сдвига

τ – напряжение сдвига

γ – деформация сдвига

a, b – константы

Было также показано, что отношение модуля сдвига (G) к его максимальному значению (G_{\max}), оцененное при малых напряжениях сдвига ($\gamma \leq 10^{-4} \%$), может быть задано как

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (11.35)$$

где

γ_r – эталонная деформация, равная τ_{\max} / G_{\max}

τ_{\max} – напряжение сдвига при разрушении

Объединяя уравнения (11.34) и (11.35) и определяя константы **a** и **b**, получаем следующие соотношения:

$$\begin{aligned} a &= 1/G_{\max} \\ b &= 1/\tau_{\max} \end{aligned} \quad (11.36)$$

Делим:

$$\gamma_r = \frac{\tau_{\max}}{G_{\max}} = a/b \quad (11.37)$$

Константы **a** и **b** определяются путем построения графика зависимости γ/τ от γ .

11.9.2. Динамический модуль сдвига загрязненной почвы

В последние годы многие гидротехнические сооружения, водохранилища и берега рек нуждались в мероприятиях для увеличения сейсмостойчивости. Однако эти соображения основаны на параметрах почвы в нормальных условиях, когда жидкость контактных пор не загрязнена. К сожалению, в реальных случаях контактная вода, как правило, имеет определенную степень загрязнения, вызванного различными жидкими, твердыми отходами, кислотными дождями и кислотными стоками. Поэтому динамическое поведение почвы в нормальных условиях может несколько отличаться от почвы в контакте с загрязненной водой. На рисунке 11.39 показано влияние кислоты (значение pH) на модули динамического сдвига смеси песка и бентонита.

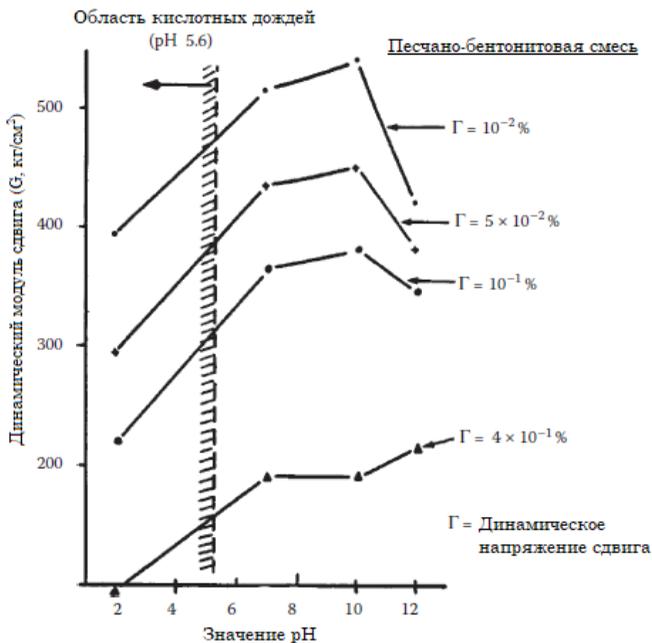


Рисунок 11.39. Динамический модуль сдвига в зависимости от значения pH (по Ду, В. L. [1987], ASTM STP 933, pp. 226–239. С разрешения).

11.10. ДИНАМИКА ВЗРЫВАНИЯ

11.10.1. Общее обсуждение

Взрывные технологии используются в геотехнике двумя способами. Первый – для взрывных работ в карьерах, в которых добываются заполнители, камни и песок для использования в качестве компонентов строительных материалов, таких как бетон или асфальтобетонная смесь. Второе использование – для удаления некоторых нежелательных объектов на дорогах, в дренажных канавах или для туннелирования. В некоторых случаях, техника взрывных работ используется в качестве части системы укрепления грунта. Независимо от цели, влияние на геологические процессы и характеристики грунта, относящиеся к результатам взрывных работ, является важным. В этом разделе мы обсудим геотехнические аспекты экологии карьера и динамику взрывных работ.

11.10.2. Взрывная энергия и безопасные пределы

Бюро горных работ США приложило значительные усилия для определения пределов безопасности при взрывных работах, которые будут или не будут вызывать повреждение сооружений (Devine, 1966; Wiss и Nicholls, 1974). Большая часть работы бюро заключается в сопоставлении смещения, частоты, пиковых

скоростей частиц и безопасного расстояния с энергией взрыва. Краткий обзор этой работы дается ниже.

11.10.2.1. Безопасное расстояние и ускорение частиц

На основании ранних исследований приборостроения Rockwell в 1927 году заявил, что конструкции, находящиеся на расстоянии более 200–300 футов от взрыва, не будут повреждены. В 1942 году Бюро шахт сообщило, что ускорение частиц является лучшим критерием для оценки повреждений сооружений.

11.10.2.2. Соотношение энергии

Crandell в 1949 году представил критерий, основанный на уровнях вибрации в земле в непосредственной близости от сооружений. Этот критерий требовал энергетического отношения, которое было определено следующим образом:

$$ER = a^2/f^2 \quad (11.38)$$

где

ER – соотношение энергии

a – ускорение, фут/с²

f – частота

11.10.2.3. Скорость частиц и масштабированное расстояние

Скорость частиц определяется Devine (1966), как показано в уравнении 11.39. Член $D/W^{1/2}$ в уравнении называется масштабированным расстоянием. Когда данные о скорости частиц с одного участка наносятся на логарифмические координаты в зависимости от масштабированного расстояния, обычно получается хорошая группировка данных. По этой причине масштабированное расстояние является параметром, часто используемым для регулирования энергии взрыва.

$$V = H \left[\frac{D}{W^{1/2}} \right]^B \quad (11.39)$$

где

V – скорость частицы, дюйм/с

H – константа для конкретного места

D – расстояние от взрыва до точки измерения, фут

W – максимальный вес заряда, фунт

B – показатель степени для определенной точки

11.10.2.4. Концепция интенсивности растрескивания Фанга–Кернера

Концепция интенсивности растрескивания Фанга–Кернера (1977) основана на характеристиках соотношения интенсивности трещин, как показано на рисунке 11.39. Она основана на типе отклика трещины, который зафиксирован ранее описанными тензометрическими датчиками. Рисунок 11.39а показывает обобщенный тип отклика, а рисунок 11.39b показывает конкретные сигнатуры известных типов вибраций. Максимальное значение раскрытия трещины является

критическим значением, которое можно получить, и его можно сравнить с другими соответствующими параметрами взрывных работ по мере их проведения. В дополнение к измерению максимального раскрытия трещины, энергия растрескивания также может быть получена путем использования продолжительности растрескивания, как показано на рисунке 11.39а. Интенсивность растрескивания может быть определена так:

$$CI = C W_{\max} t \quad (11.40)$$

где

CI – интенсивность растрескивания, дюйм/с

C – постоянная (в зависимости от типа материала она варьируется от 0 до 1, при этом кирпичная или бетонная конструкция дает от 0,3 до 0,6)

W_{\max} – максимальное раскрытие трещины, дюйм

t – продолжительность, с

Максимальное раскрытие трещины (W_{\max}) и продолжительность времени (t), указанные на рисунке 11.39а и в уравнении 11.39, должны быть определены экспериментально. Следующая методика была использована для инструментовки и контроля конструкций во время близких взрывных работ: две металлические шариковые точки установлены в желаемом месте, предпочтительно в месте с начальными трещинами, с использованием быстро схватывающегося полимера, который может высохнуть в течение 5 минут. Между этими двумя шариковыми наконечниками установлен тензометрический датчик (рисунок 11.40), который подключен к записывающему устройству. На фотографии показаны различные типы зажимных манометров для измерения характеристик конструкции на месте или движения грунта в результате динамических воздействий. Рисунок 11.40а – это стандартный датчик для взрывных работ, а рисунок 11.40b – это модификации для другого мониторинга. В таблице 11.7 приведена сводная информация о технических приложениях, измеримых параметрах, причинах и местах использования манометров для динамического мониторинга вибрации.

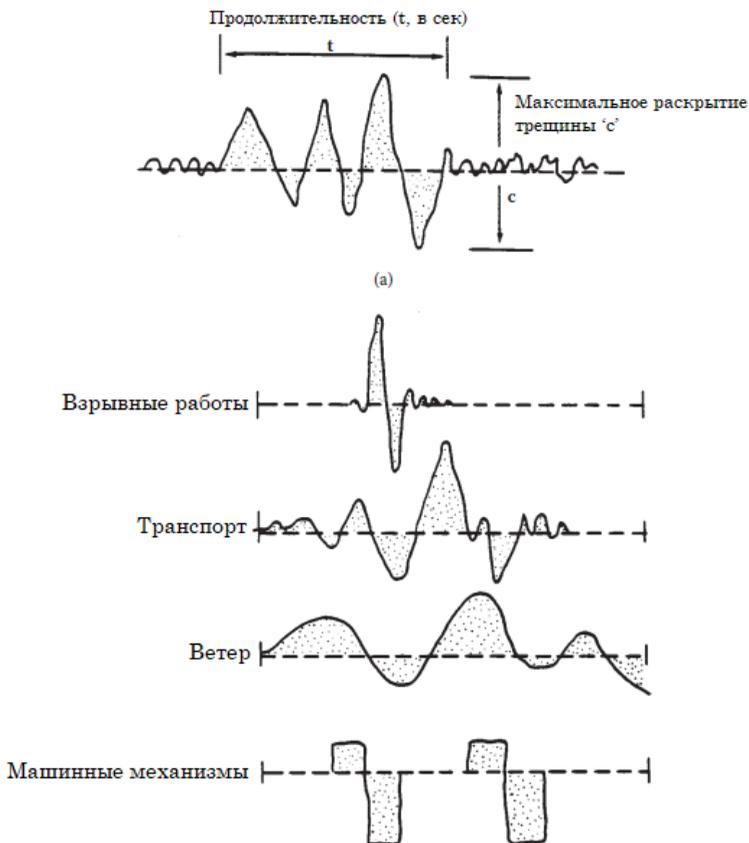


Рисунок 11.40. Обобщенные и специфические кривые динамического отклика, которые отслеживаются с помощью тензометрических датчиков зажимного типа: (а) обобщенная кривая динамического отклика и (б) специфические кривые динамического отклика.

11.10.2.5. Критерии безопасных границ взрывов

Критерии безопасных границ взрывов включают в себя (1) минимальное безопасное расстояние, (2) ускорение частиц, (3) энергетическое соотношение, (4) смещение частиц, (5) скорость частиц и (6) расстояние по шкале, приведенное в таблице 11.8. Реакция человека на взрывную вибрацию – сложная проблема. Сам организм человека сложен, и для изучения его реакции на вибрации нам необходимо учитывать не только патологические и психологические эффекты, но и физиологические.

Таблица 11.7. Сводка технических средств, измеримых параметров, причин и мест применения измерительных зажимов для динамического мониторинга вибрации.

Проблема	Причины и измеримые параметры	Предлагаемые места расположения манометров
Безопасность существующих конструкций	Вызывается вибрацией машины, взрывом, движением автомобиля, поезда, ветра, строительными работами и др.	Конструкция стен, полов, потолков, колонн, балок
Дорожное покрытие магистралей	Появление трещин внутри дорожного покрытия и на его поверхности вызвано движением автомобилей и строительными работами	На строительных или расширительных швах или на существующих трещинах
Дорожное покрытие в аэропорту	Вызвано ударной нагрузкой при посадке и рулении самолета	То же, что и для дорожного покрытия
Устойчивость горных склонов	Строительные работы, оседание, тектоническое движение	На местах соединения или разрывов горных пород
Карьеры, геологические разрезы и глубокие шахты	Влияние на соседние структуры	Структурируйте стены, полы, потолки или другие элементы конструкции
Вибрации машины	Влияние на почву, горные породы и сооружения	Фундаменты
Оценка сейсмической безопасности	Сейсмическая активность	Отдельная станция мониторинга
Волновое воздействие	Динамические силы волн	Пирсы, переборки, береговые сооружения
Воздействие на окружающую среду	Ветер, шторм, бытовые вибрации и т. д.	Ожидаемый структурный компонент

Таблица 11.8. Краткое изложение пределов безопасности для конструкций при взрывных работах.

Параметры	Пределы безопасности
Размер заряда и расстояние	200–300 футов
Частица ускорения	0,1 г
Энергетический коэффициент	3
Смещение частиц	0,03 дюйма 0,9 ips
Скорость частиц	2.0 ips 7–20 ips
Расстояние шкалы	50 футов/фунт

11.11. РЕЗЮМЕ

1. Представлены характеристики удельного веса в зависимости от содержания влаги в интерпретации теории поля энергии частиц.

2. Обсуждаются лабораторные и полевые характеристики уплотнения почвы и факторы, влияющие на результаты испытаний. Также рассматривается динамическое уплотнение.

3. Суммируются напряженно-деформированная прочность почвы и критерии ее разрушения. Проведено сравнение характеристик сдвига нормально уплотненных и сильно уплотненных глин.

4. Рассматриваются понятия остаточной прочности, методы испытаний и интерпретация данных. Даны корреляции параметров остаточного сопротивления с другими константами грунта, такими как содержание глины, верхний предел пластичности, индекс пластичности и т. д. Представлено сравнение результатов испытаний различных исследователей.

5. В уравнении 11.14 обсуждается и описывается простой метод определения параметров сдвига c и ϕ неуплотненного и недренированного сдвига (UU) из неограниченной прочности на сжатие (q_u) и прочности на растяжение.

6. Обсуждается динамический модуль сдвига загрязненных образцов почвы и проводится сравнение со статической нагрузкой.

7. Рассматривается основная концепция динамики взрывных работ. Предлагается новая концепция, основанная на критериях интенсивности растрескивания.

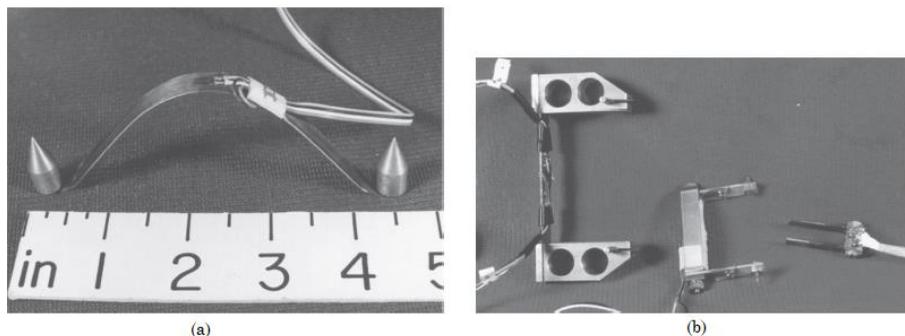


Рисунок 11.41. Различные типы зажимных манометров для измерения *in situ* структурных откликов или движения грунта в результате динамических воздействий: (а) стандартный датчик для взрывных работ и (б) модификации для другого мониторинга.

ПРОБЛЕМАТИКА

11.1. С точки зрения инженерных свойств (прочность на сдвиг, сжимаемость и проницаемость) объясните, почему спецификация массы сухого блока не является удовлетворительным показателем окончательных характеристик земляной плотины или насыпи на шоссе.

11.2. Показатели плотности поля и содержания воды в первых нескольких слоях засыпки усредняются следующим образом: вес = 19,3 кН/м; содержание воды = 8,2 %. Какие конкретные рекомендации вы бы дали подрядчику, чтобы он мог соответствовать спецификациям с минимальными для него затратами?

11.3. Большинство спецификаций уплотнения для строительства шоссе или земляной плотины запрещают использование любого грунта, который не имеет максимальной сухой плотности, измеренной в модифицированном испытании на уплотнение AASHTO, превышающем 100 pfc. Вы когда-нибудь пренебрегали бы этой спецификацией при строительстве земляной плотины? Если да, то при каких обстоятельствах?

11.4. Кратко объясните взаимосвязь между расчетом под нагрузкой и способностью выдерживать нагрузку. Какие факторы, кроме консолидации под рассматриваемой нагрузкой, могут стать причиной оседания? Обсудите любой из этих факторов подробно.

11.5. Некоторое время назад в районе, где 10-футовый слой глины был перекрыт 22-футовым слоем песка, был установлен памятник весом 250 тонн. Местный уровень грунтовых вод составляет 11 футов ниже поверхности земли. Текущее поровое давление воды в центре слоя глины составляет 1110 фунтов на квадратный дюйм. Предполагая, что глина обычно консолидировалась во время строительства и что нагрузка на памятник может рассматриваться как точечная нагрузка, определите, какой процент консолидации произошел при дополнительной нагрузке на памятник?

11.6. Нетронутые образцы берутся из двух месторождений глины одинакового минералогического и гранулометрического состава. Обе почвы обычно уплотнены и насыщены. Глина [А] взята из пресноводного озера, а глина [В] – со дна океана.

(а) Два образца глины объединяются в лаборатории с образованием одного и того же соотношения пустот (или удельного веса), а затем подвергаются неограниченному сжатию. Какой образец, как вы ожидаете, будет иметь более высокую прочность?

(б) Оба образца подвергаются тщательному формованию, а затем подвергаются неограниченному сжатию. Какова измененная прочность по отношению к прочности при ненарушенной структуре? Какой образец имеет более высокую прочность?

(с) Испытание на неограниченное сжатие проводится через 2 года после повторной обработки. Какой образец будет прочнее?

11.7. Обращаясь к проблеме 11.6, два образца глины выщелачивают дистиллированной водой в лаборатории до тех пор, пока концентрация соли в

поровых флюидах почвы практически не станет одинаковой. Предположим, что в процессе выщелачивания нет никаких нарушений структуры почвы.

(а) Два образца объединены с образованием одного и того же соотношения пустот и подвергнуты неограниченному сжатию. Какой образец прочнее?

(б) Какой образец обладает более высокой прочностью после тщательной перемотки?

11.8 Вопросы касаются прочности на сдвиг загрязненного грунта как при статических, так и при динамических нагрузках: почему прочность на сдвиг уменьшается, когда значение pN уменьшается при динамической нагрузке? Почему прочность на сдвиг увеличивается, когда значение pN уменьшается при статической нагрузке? Объясните.

11.9 Что такое генетический подход? Прокомментируйте генетический подход для анализа характеристик прочности на сдвиг и устойчивости почвы под нагрузкой.

11.10. Обсудить характеристики сдвига и сжимаемости загрязненной ненасыщенной мелкозернистой почвы.

12. Геотехнические инженерные области применения в

12.1. Введение

12.1.1. Общее обсуждение

Все гражданские инженерные сооружения прямо или косвенно находятся на грунте; следовательно, устойчивость как надповерхностных, так и подповерхностных структур зависит от стабильности грунта, на которую сильно влияют местные условия, как показано на рисунке 12.1. В целом, все конструктивные решения основаны на нагрузках, однако критерии проектирования, основанные только на коэффициенте нагрузки, не дают полной картины и пренебрегают другими важными факторами, которые контролируют общую устойчивость всех строительных инженерных сооружений, – критериями расчета факторов окружающей среды. В настоящее время критерии расчета коэффициента нагрузки являются общепринятыми для большинства конструкций строительных сооружений, включая системы и фундаменты для укрепления грунта. Проектирование сооружений в гражданском строительстве носит междисциплинарный характер и требует сотрудничества всех смежных областей для обеспечения безопасной и экономичной структурной системы. В этой главе представлен краткий обзор обычно используемой концепции коэффициента нагрузки. Кроме того, также обсуждаются и сравниваются предлагаемые критерии расчета нагрузки и факторов окружающей среды.

12.1.2. Сфера экологической геотехнологии

Как показано на рисунке 12.1, фундамент является частью общей системы укрепления грунта (или модификации грунта) и сердцем экологической геотехнологии. Укрепления грунта – это общий термин для обозначения любых механических, гидрологических, физико-химических или биологических методов или любой комбинации таких методов, используемых для улучшения определенных свойств природных или искусственных отложений почвы. Цели этого улучшения:

- 1) укрепление грунта до разрушения;
- 2) укрепление грунта в течение срока его полезного использования;
- 3) укрепление грунта после преждевременного или неожиданного разрушения;
- 4) временные системы улучшения.

Случай 1 обычно имеет место, когда почва слабая, с низкой несущей способностью, а уровень грунтовых вод высокий. Случай 2, как правило, относится к надлежащему техническому обслуживанию или ремонту определенных областей возможного разрушения для продления срока полезного использования почвы. Случай 3: зачастую разрушение грунта является неожиданным, тем не менее необходимо изучить причины разрушения до того,

как начнется улучшение грунта. Случай 4: система укрепления грунта, используется в определенных условиях и определенных местах, например, под водой, или там, где строится постоянная конструкция.

12.1.3. Основные положения систем улучшения грунта

Чтобы сделать системы укрепления грунта эффективными, необходимо учитывать некоторые основные факторы и оценивать взаимодействие между почвой, окружающей средой и системами укрепления. Некоторые из этих факторов перечислены ниже.

1. Чувствительность почвы к окружающей среде (раздел 5.12).
2. Загрязнение почвы и воды (разделы 1.4 и 5.6).
3. Проблемные или неблагоприятные условия грунта (глава 13).
4. Подбор строительного материала(-ов).

В целом, системы укрепления грунта имеют дело с огромным количеством земных материалов. В настоящее время ежегодные показатели объема земляных материалов, используемых в строительной сфере, составляют миллиарды тонн и являются самыми высокими среди всех других строительных материалов. Другие потребности, которые следует учитывать, включают недавний дефицит энергии и материалов. Эти проблемы создают некоторые сложности для инженеров при поиске альтернативных или недорогих материалов для использования в системе укрепления грунта.

Программа улучшения грунта может существенно повлиять на социально-экономические условия окружающей среды, если она хорошо спланирована и технически выполняема. Она также может дать максимально возможную степень использования земли. Например, использование санитарных площадок для захоронения отходов может превращать отходы и пустынные земли в полезные земли, что может оказать значительное экономическое воздействие. В этой главе обсуждения сосредоточены на экологических аспектах систем и оснований для укрепления грунта.

1. Критерии расчета нагрузки как фактора окружающей среды: взаимодействие фундамента со структурой, взаимодействие между структурой и фундаментом.
2. Экологические нагрузки: боковое давление, ветер, землетрясение
3. Фундаменты: сваи, шпунтовые, переборочные и сотовые конструкции.
4. Система укрепления грунта: усиленная земля, цементация
5. Подводный ремонт.

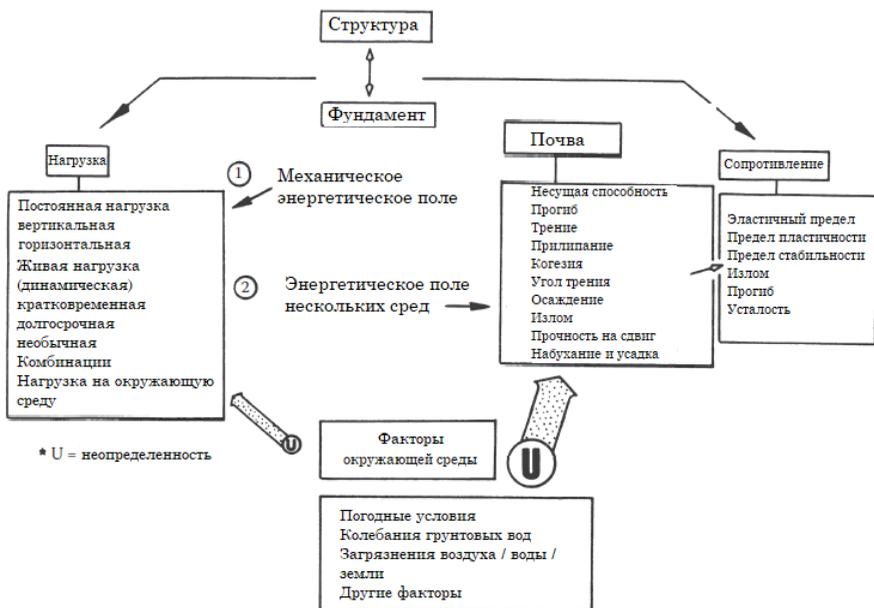


Рисунок 12.1. Критерии проектирования факторов нагрузки и окружающей среды для фундаментов (по англ.: Н. У. [1987], 1st. Int. Symp. on Environmental Geotechnology, v. 2, D.1 and D.3, Envo Publ. Co., Bethlehem, PA., pp. 290, 297, 310, 340. Перепечатано с разрешения Envo Publishing, Bethlehem, PA).

12.2. КРИТЕРИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НАГРУЗКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ФАКТОРА

12.2.1. Критерии и подходы расчета коэффициента нагрузки

12.2.1.1. Критерии расчета коэффициента нагрузки

Критерии расчета коэффициента нагрузки использовались для многих конструктивных сооружений в различных инженерных проектах. С точки зрения структурной инженерии, этот подход демонстрирует некоторые преимущества, такие как увеличение вероятности использования будущих разработок при проектировании, а также конструкции, приводящие к более экономичной структуре. Расчет коэффициента нагрузки – это метод пропорции структур для кратности используемой нагрузки. Расчетная предельная нагрузка получается путем применения коэффициентов к различным рабочим нагрузкам. Расчет коэффициента нагрузки включает в себя следующие функции.

1. *Функция нагрузки:* включает рассмотрение типов нагрузок и факторов, которые должны применяться к каждой из них. Существуют постоянная нагрузка, полезная нагрузка, долгосрочная, кратковременная и чрезвычайная, а также различные их сочетания.

2. *Функция сопротивления*: существует «функция сопротивления» или пределы полезности конструкции. Процесс проектирования уравнивает их с помощью аналитических методов.

12.2.1.2. Подходы расчета коэффициента нагрузки

Одной из уникальных особенностей расчета коэффициента нагрузки является использование нескольких коэффициентов нагрузки. Постоянные нагрузки подвержены меньшим колебаниям и неопределенности, чем рабочие нагрузки, и на этой основе нецелесообразно назначать более низкий коэффициент нагрузки для постоянных нагрузок, чем для рабочих нагрузок. Конечным результатом применения расчета коэффициента нагрузки часто является структура с меньшим весом, особенно в тех случаях, когда полезная нагрузка составляет относительно небольшую долю постоянной нагрузки. Результирующая экономия является основной причиной того, что в конечном итоге будет использоваться расчет коэффициента нагрузки (AISC, 1993). Использование конструкции коэффициента нагрузки, в первую очередь, означает, что:

- 1) конструктивное условие является предельным для состояния разрушения, а не допустимым или рабочим состоянием;
- 2) существуют более расчетные условия загрузки.
- 3) расчет коэффициента нагрузки открывает путь для более широкого использования вероятности при проектировании в качестве будущего развития;
- 4) это может привести к более экономичной структуре.

12.2.2. Экологические критерии расчета коэффициента нагрузки

12.2.2.1. Общее обсуждение

Традиционный подход к анализу и проектированию большинства фундаментов или других геоструктур основан на допустимых или рабочих условиях. Независимо от типов нагрузки и условий окружающей среды, они используют предельную нагрузку или критическую нагрузку, деленную на коэффициент безопасности. Фактор безопасности обычно обеспечивается строительными нормами, спецификациями, стандартными учебниками, справочниками или в некоторых случаях просто индивидуальным опытом. К сожалению, грунт не похож на большинство других строительных материалов; он чрезвычайно чувствителен к местным условиям окружающей среды, таким как температура, содержание влаги и типы поровых флюидов, существующих в пустотах почвы, и т. д., которые значительно изменяют поведение почвы. Часто происходят многочисленные неожиданные нарушения фундамента, потому что при анализе и проектировании фундаментов эти параметры окружающей среды часто не входят в число факторов, подлежащих рассмотрению.

12.2.2.2. Факторы окружающей среды

Как говорилось в предыдущем разделе, критерии проектирования, основанные только на коэффициенте нагрузки, не дают полной картины и пренебрегают другим важным фактором, который контролирует общую устойчивость всех строительных инженерных сооружений, критерием расчета факторов окружающей среды. Местные факторы окружающей среды включают погодные условия, колебания грунтовых вод и степень загрязнения системы грунт–вода–

воздух, как показано на рисунке 12.1. Кроме того, рисунок 12.1 иллюстрирует неопределенность (риск), связанную с анализом и проектированием фундамента, и тот факт, что фактор окружающей среды является гораздо более важным и значительным по сравнению с обычным расчетом коэффициента нагрузки.

12.2.2.3. Подходы к расчету коэффициента нагрузки на окружающую среду

Как обсуждалось в разделах 3.8 и 5.12, мелкозернистые почвы более чувствительны к окружающей среде, чем крупнозернистые, потому что мелкозернистые почвы имеют большую площадь поверхности. Фактор окружающей среды играет более важную роль, чем расчет коэффициента нагрузки во всех гражданских инженерных сооружениях, базирующихся на грунтах. Проектирование гражданских сооружений имеет междисциплинарный характер и требует сотрудничества всех смежных областей, чтобы обеспечить безопасную и экономичную структуру.

12.3. РАЗНИЦА ДВУХ ВИДОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ: ПОЧВА–СООРУЖЕНИЕ И СООРУЖЕНИЕ–ПОЧВА

12.3.1. Общее обсуждение

Взаимодействие структуры с грунтом включает в себя ветровую нагрузку и структурную нагрузку, а взаимодействие почвы с конструкцией включает взрывные работы, вибрацию от оборудования и транспортных средств, движение свай во время строительства и сейсмические нагрузки, которые связаны с местной средой, как показано на рисунке 12.2. Добавлены некоторые дополнительные иллюстрации, включающие боковое давление грунта, фундамент свай и устойчивость склона для дальнейшего объяснения взаимодействия в системе сооружение – почва – окружающая среда.

Местные факторы окружающей среды включают погодные условия, колебания грунтовых вод и степень загрязнения грунтовых вод и воздуха, как указано в разделе 8.2. Кроме того, на рисунке 12.1 показана неопределенность, связанная с анализом и проектированием фундамента, а также то, что фактор окружающей среды является гораздо более важным и значительным по сравнению с традиционным расчетом коэффициента нагрузки.

12.3.2. Взаимодействие сооружений и почвы

Ветровая нагрузка, действующая на здание, является типичной проблемой взаимодействия между самим сооружением и фундаментом. На рисунке 12.3 показано влияние ветровых нагрузок на высотное здание. Экспериментальные данные были получены из Университета Гонконга; они сообщали о поведении ветра вокруг острова Гонконг и в прибрежной зоне Южного Китая (Maskey, 1975). Механизм ветровой нагрузки, относящийся к системе здание – фундамент – грунт, до сих пор не совсем понятен; однако проектировщики считают, что определенное количество ветровой нагрузки было перенесено в грунт. De Simone (1973) указал, что пассивное давление грунта, прочность на сдвиг и боковое

сопротивление подповерхностной структуры, такой как сваи, должны быть изучены, а поведение почвы под воздействием ветра должно быть оценено.

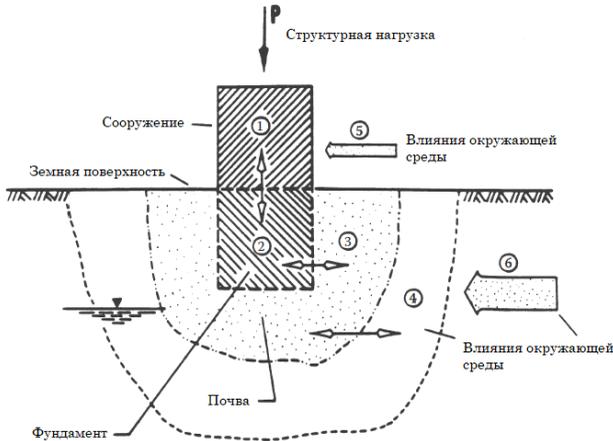


Рисунок 12.2. Взаимодействие структура – фундамент – почва – окружающая среда.

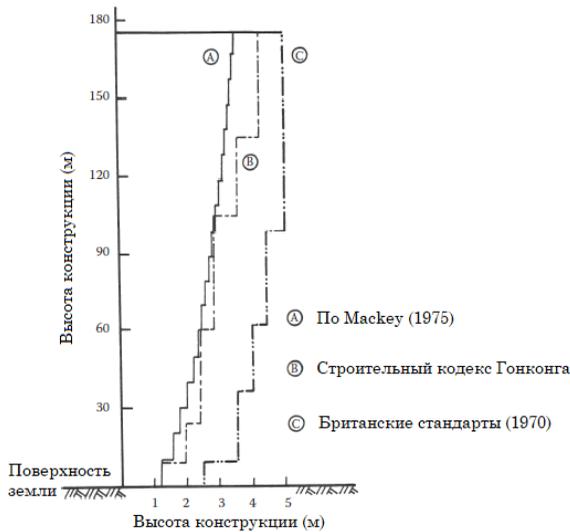


Рисунок 12.3. Влияние ветровой нагрузки на систему структура–фундамент–почва (по Mackey, S. [1975], Proc. Pan Pacific Tall Building Conference, Honolulu, HI, pp. 64–75).

12.3.3. Взаимодействие почва–фундамент–сооружение

Явление взрыва грунта является типичной проблемой взаимодействия в системе сооружение–фундамент–почва, как говорилось в разделе 11.10. В этом разделе обсуждение сосредоточено на механизме этого взаимодействия. Явление этого взаимодействия может быть визуализировано в более упрощенной форме, как показано на рисунке 12.4. Четыре отдельных действия являются результатом взрыва: (1) энергия, передаваемая взрывом породе или почве; (2) распространение

волны через породу и почву, а также между ними и рассматриваемым сооружением; (3) энергия, передаваемая от породы или грунта в область структурного фундамента и на сам фундамент; (4) структурный отклик на энергию, которую поглощает сооружение.

Взаимодействие сооружение–фундамент–почва из-за взрывных работ в карьере, отраженное появлением трещины в стене, показано на рисунке 12.5. Рисунок показывает связь между появлением трещины в стене и расстоянием для различных типов стен и фундаментов. Экспериментальные данные, использованные на рисунке, получены в восточной части Пенсильвании. Характеристики взрывных работ отражаются в масштабе расстояния (уравнение 11.20). Наблюдаются совсем разные отклики для различных типов фундаментов и стен, как показано на рисунке 12.5. Рисунок 12.6 суммирует взаимодействие почвы и сооружений при динамическом нагружении и их измеримые параметры.

- ① Энергия, переданная от взрыва земле
- ② Энергия, передаваемая через землю (земная волна)
- ③ Энергия, передаваемая от земли к сооружению
- ④ Реакция сооружения на энергию, которую оно поглощает
- ⑤ Часть энергии передается в некоторые места



Рисунок 12.4. Влияние взрывных работ на систему почва–фундамент–сооружение.

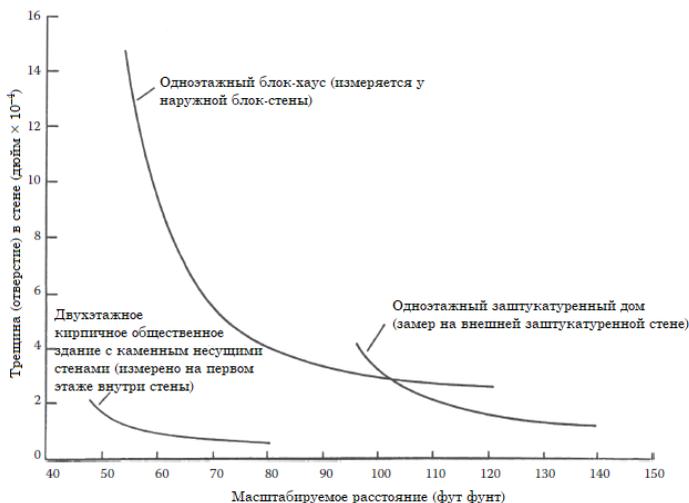


Рисунок 12.5. Влияние взрывных работ на систему фундамент–сооружение, отражающееся на появлении трещины в стене.

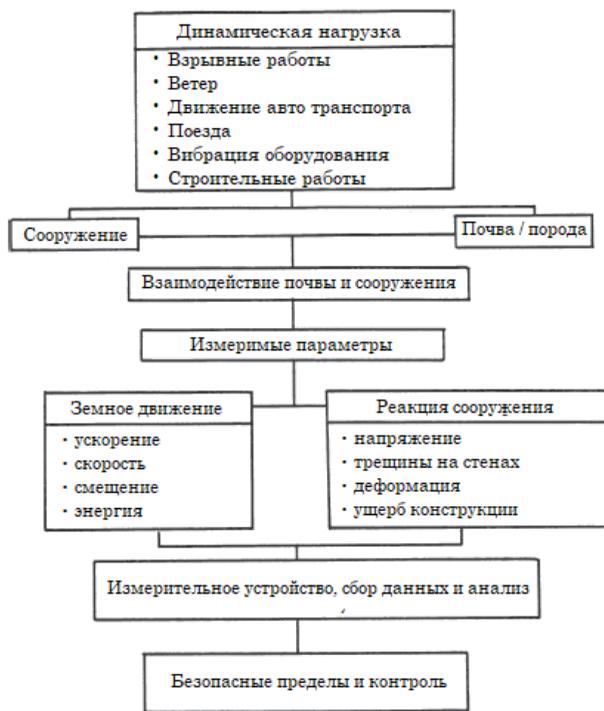


Рисунок 12.6. Обобщение взаимодействия грунта и сооружения при динамическом нагружении и измеримые параметры.

12.4. НАГРУЗКА, ФАКТОР БЕЗОПАСНОСТИ И ДОПУСТИМЫЕ УСЛОВИЯ

12.4.1. Нагрузки, в том числе нагрузки окружающей среды

12.4.1.1. Нагрузки

Нагрузки, действующие на конструкцию, включают статические, динамические нагрузки и нагрузки окружающей среды. Статическая нагрузка (постоянная нагрузка) включает вес конструкции и всего материала, постоянно к ней присоединенного. Постоянное и стационарное действующее оборудование обычно рассматривается как часть постоянной нагрузки. Динамическая нагрузка включает в себя полезную нагрузку и ударную нагрузку. Активная нагрузка включает в себя все нагрузки, которые не являются постоянной частью конструкции, но, как ожидается, будут накладываться на конструкцию в течение части или всего срока ее полезного использования. Вертикальные нагрузки из-за ветра или снега не считаются полезной нагрузкой. Деятельность людей, перегородки, мебель, товары для склада и механическое оборудование являются основными составляющими полезной нагрузки. Величина такой нагрузки,

используемой при проектировании различных зданий, обычно указывается в местных строительных нормах. Железнодорожные и автодорожные мосты, подверженные транспортным нагрузкам и реакции от промышленных кранов и подъемников, иногда составляют большую часть полезной нагрузки.

12.4.1.2. Нагрузки окружающей среды

Нагрузки окружающей среды включают землетрясения, ветер, снег, давление воды и прочее. Землетрясение может привести к боковой силе. Эта боковая сила может действовать на конструкцию в любом горизонтальном направлении. Эффект этой боковой силы может быть оценен в соответствии с единым строительным кодексом. Ветровая нагрузка действует на все открытые поверхности конструкции. Выступающие части подвергаются давлению, создающему подъемную силу. Величина расчетного давления обычно оговаривается в местных строительных нормах. На рисунке 12.3 показано влияние ветровой нагрузки на систему сооружение–фундамент–почва. Расчет снеговой нагрузки на квадратный фут горизонтальной проекции крыши приведен в местных строительных нормах. Другие нагрузки включают в себя давление воды, льда, волн и т. д. Конструкции, построенные на быстро текущей реке, на берегу озера и т. д., также подвергаются воздействию сил, вызванных течением, льдом и волнами. Общие нагрузки, действующие на фундамент, рассчитываются с учетом трех условий: в зонах землетрясения сила, возникающая в результате движения земли, должна заменить силу, вызванную ветром. Это предполагает, что максимальное давление ветра и максимальное движение земли при землетрясении не существуют одновременно.

12.4.2. Коэффициент безопасности и допустимые нагрузки

Фактор безопасности или степень безопасности используется инженерами для определения того, будут ли земляные работы проводиться в более худших условиях, чем те, которые брались во внимание при проектировании. Нынешняя концепция определения коэффициента безопасности для устойчивости земного склона основана на законе Кулона, принципах и применении методов расчета различных факторов безопасности. Используется вероятностный анализ для расчета безопасности фундаментов для различных нагрузок и распределений прочности. Прикладная нагрузка и прочность почвы считаются случайными величинами. Соответствующая функция вероятности определяется эмпирически путем подгонки к экспериментальным данным. Допустимые нагрузки могут быть получены путем расчета предельной нагрузки с учетом коэффициента безопасности.

12.5. ДОПУСТИМАЯ НАГРУЗКА НА ПОЧВУ

12.5.1. Отношение «нагрузка–фундамент»

Нагрузка – это механическая энергия; тем не менее несущая способность находится в энергетическом поле нескольких сред, поскольку на него сильно влияют местные условия окружающей среды, такие как свойства почвы, колебания грунтовых вод и глубина замерзания. Текущий подход заключается в

том, что нагрузка или давление развиваются под фундаментом, обычно имея отношение к предельной производительности при разрушении почвы. Допустимое или безопасное давление на опору равно предельной производительности, деленной на коэффициент безопасности. Кроме того, перемещение фундамента может быть результатом его разрушения или же обвала в результате чрезмерной усадки; следовательно, должен быть обеспечен адекватный фактор защиты фундамента от разрушения и должен быть учтен достаточный запас прочности от чрезмерного оседания.

Чтобы обеспечить достаточный коэффициент безопасности фундамента от разрушения, необходимо знать предельную несущую способность (Q_u) грунта. Обычно коэффициент безопасности (F_s) от 2 до 3 используется с допустимой несущей способностью (Q_a); тогда $Q_a = Q_u/F_s$. Другие параметры конструкции включают в себя ширину и глубину конструкции и свойства грунта, включая сцепление, угол трения и удельный вес. При сравнении этих параметров становится ясно, что некоторые из них более чувствительны к окружающей среде, чем другие. Если все параметры в равной степени разделены на один и тот же фактор безопасности, то в результате некоторые из них будут немного занижены, а другие – завышены. Подробные процедуры каждого метода, применяемого к проектированию фундаментов, обсуждали Chen и McCarron (1991).

12.5.2. Данные о допустимых нагрузках из строительных нормативов

Многие крупные города по всему миру предоставляют свои собственные строительные нормы и правила для проектирования фундаментов. Эти значения, как правило, основаны на многолетнем опыте в их конкретной зоне или регионе. Эти значения просто основаны на местном опыте и часто называют предполагаемым давлением. Предполагаемое давление основано на визуальной классификации почвы, такой как мягкая глина, жесткая глина, плотный песок и рыхлый песок. Эти значения, полученные из строительных норм и правил, полезны для предварительного анализа и проектирования систем фундаментов. Однако несущая способность, основанная на строительном кодексе, не влияет на уровень грунтовых вод, глубину и размер фундамента и другие условия окружающей среды.

На несущую способность грунта влияет множество факторов. Среди этих факторов наиболее важными являются уровень грунтовых вод и глубина замерзания. И подземные воды, и глубина замерзания обсуждались в разделе 8.3. Несущая способность проблемных почвенных отложений и площадок для захоронения отходов будет обсуждаться в главах 13 и 17. Несущая способность грунтов будет значительно зависеть от местной окружающей среды. В летние месяцы несущая способность в целом значительно выше, чем в весенний период, когда происходит оттаивание. На рисунке 12.7 показано влияние температуры на несущую способность, как писали Kersten и Cox (1951).

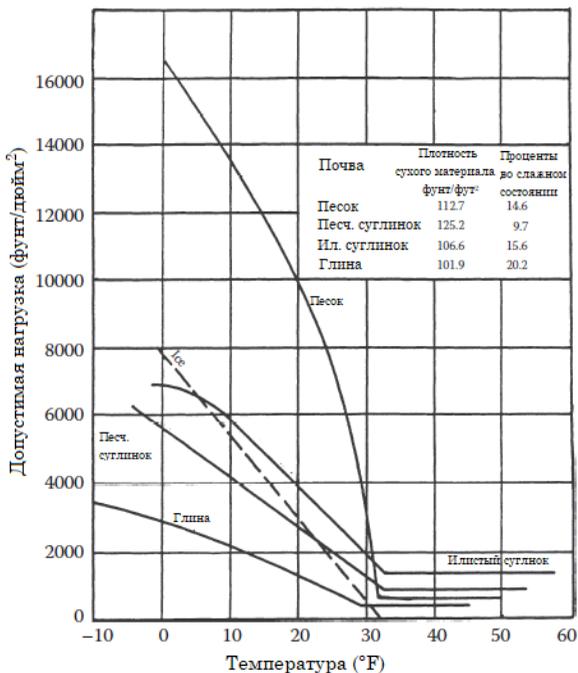


Рисунок 12.7. Кривая «допустимая нагрузка – температура для различных материалов» (по Kersten, M. S. and Cox, A. E. [1951], HRB Bulletin n. 40, pp. 32–38. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не защищен авторскими правами).

12.6. БОКОВОЕ ДАВЛЕНИЕ ГРУНТА

12.6.1. Активное и пассивное давление грунта

Когда боковое давление грунта действует на жесткую стенку, например на подпорную стенку, распределение давления вдоль стены можно разделить на три отдельные области: активную, пассивную и в состоянии покоя, как показано на рисунке 12.8. Очевидно, что стена может иметь два направления движения: в сторону берега (грунта) или в сторону от берега. Если стена первоначально находится в состоянии покоя и удерживается силой, три давления, действующие на стену, обычно определяются как активное давление грунта (P_a), пассивное давление (P_p) и давление в состоянии покоя (P_0). С механической точки зрения эти три давления можно объяснить следующим образом.

По мере постепенного уменьшения P_p почва подвергается упругой и неупругой деформации и в конце концов достигнет стадии разрушения. Эта разрушающая нагрузка обычно называется пассивным давлением на грунт. Давайте рассмотрим ту же проблему, проиллюстрированную на рисунке 12.8, с точки зрения теории энергии частиц поля. Активное давление грунта – это когда масса грунта действует как нагрузка на жесткую стенку. Этот вес почвы рассматривается как механическая энергия. Изменение нагрузки, представляющей вес почвы, может быть изменено с сухого состояния на насыщенное состояние.

Однако в случае пассивного давления грунта, когда нагрузка (сама стена) воздействует на почву (берег), поведение почвы изменяется при изменении местных условий окружающей среды. Например, для одной и той же почвы обратной засыпки поведение между весенними и летними месяцами будет значительно отличаться, поэтому в пассивной зоне механизм должен рассматриваться как в энергетическом поле нескольких сред. Когда деформация или смещение изменяется от активной стадии к пассивной, точка поворота, в которой в таком случае отсутствует давление, называется давлением грунта в состоянии покоя (P_0). Коэффициент давления грунта называется K_0 . Его характеристики и измерения будут обсуждаться в следующем разделе.

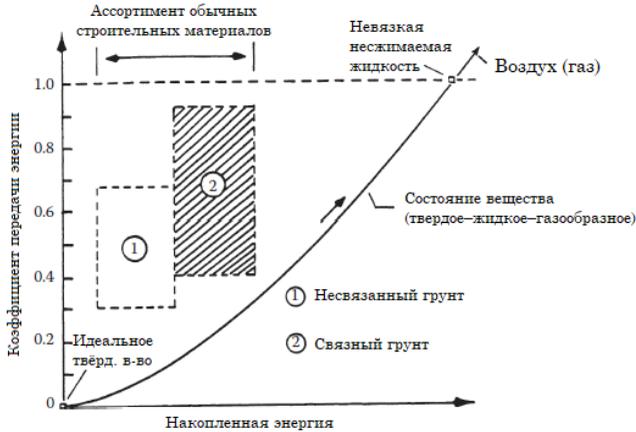


Рисунок 12.9. Коэффициент передачи энергии для различных состояний вещества.

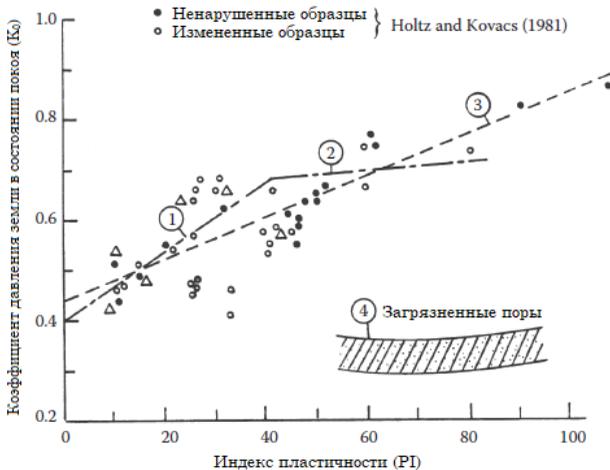


Рисунок 12.10. Коэффициент давления грунта в состоянии покоя; K_0 в зависимости от типа почвы (как показано индексом пластичности, PI)

12.6.2. Коэффициент давления грунта в состоянии покоя, K_0

Многие встречающиеся в природе отложения, а также искусственные осадки откладываются и уплотняются в горизонтальных слоях. В таких условиях отношение боковых и вертикальных напряжений известно как коэффициент давления грунта в состоянии покоя, который обозначается символом K_0 . Al-Hussaini (1981) провел всестороннее исследование K_0 и сравнил различные методы определения этого параметра. Для упругого изотропного материала при первой загрузке значение K_0 может быть выражено непосредственно через коэффициент Пуассона. Следовательно, значение K_0 и напряженно-деформационная реакция почв в условиях K_0 важны для инженерных проблем, связанных с урегулированием насыпок, боковым давлением, выемкой грунта и другими проблемами, где боковая деформация ограничена.

Состояние бокового давления грунта P , действующего на жесткую стенку, показано на рисунке 12.8. Изменение коэффициента передачи энергии, известного в геотехнике как коэффициент давления грунта в состоянии покоя, показано на рисунке 12.9. Если твердое тело демонстрирует очень большую когезию ($c \rightarrow \infty$), K_0 стремится к нулю. С уменьшением сил связи между элементарными частицами, вызванными повышением температуры (тепловой энергии) за счет вибрации (механическая энергия), значение K_0 увеличивается до 0,4–0,5 (Kézdi, 1964), что характерно для зерновых сборок. Большие значения имеют место для вязких жидкостей, в которых внутреннее сопротивление сдвигу намного меньше, и, наконец, $K_0 = 1$ достигается для идеальных жидкостей с нулевым внутренним трением.

В случае газов K_0 превышает 1 из-за движения атомной частицы. Увеличение K_0 может быть достигнуто путем передачи энергии в систему либо в виде механической энергии, вытесняющей частицы из твердого тела, либо в виде энергии вибрации, уменьшающей количество контактов между частицами, таким образом уменьшая внутреннее сопротивление переходным образом, либо в виде тепловой энергии. Это увеличивает расстояния между частицами и увеличивает их скорость, превращая твердое вещество в жидкость или жидкость в газ. Как показано на рисунке 12.9, чем больше запас энергии, тем больше коэффициент передачи энергии или коэффициент бокового давления (K_0).

12.6.3. K_0 для глинистой почвы и песка

12.6.3.1. Глинистая почва

На рисунке 12.10 показана зависимость K_0 от типа почвы, отраженная индексом пластичности. Линейная зависимость обнаруживается в том, что увеличение индекса пластичности также увеличивает K_0 . Тем не менее обнаруживаются и существенные различия, как показано на рисунке. Для загрязненной системы почва–вода значение K_0 , как правило, ниже, потому что загрязненная почва образовала трещины, как говорилось в разделе 6.6. На рисунке 12.11 показана взаимосвязь K_0 и коэффициента переуплотнения (OCR) для различных типов торфяных почв. OCR увеличивается с увеличением K_0 для всех видов торфа.

12.6.3.2. K_0 для песка

Лабораторное измерение K_0 песка производится различными приборами, в том числе линейным переменным дифференциальным преобразователем (LVDT) и обычным тензодатчиком, как отмечалось Al-Hussaini (1981). Результаты между теоретическими и экспериментальными результатами для песка приведены на рисунке 12.12. Для этих результатов получены значительные различия.

12.7. СИЛЫ ТРЕНИЯ И УГЛЫ МЕЖДУ ДВУМЯ МАТЕРИАЛАМИ

12.7.1. Угол трения при взаимодействии почва–почва

В разделе 2.8 рассмотрен процесс нагрузки–деформации почвы. Во время данного процесса должно наблюдаться относительное движение частиц почвы. Для преодоления сопротивления трения, возникающего между частицами во время движения, необходима сила. В геотехнических задачах рассматриваются два важных случая: (1) сила трения при взаимодействии почва–почва и (2) сила трения между почвой и иной почвой. Угол трения между почвами обычно называют углом внутреннего трения (ϕ), как указано в уравнении 11.1. Этот угол может быть определен с помощью обычных геотехнических процедур, таких как прямое испытание на сдвиг или трехосное испытание на сдвиг, как описано в разделе 11.7.

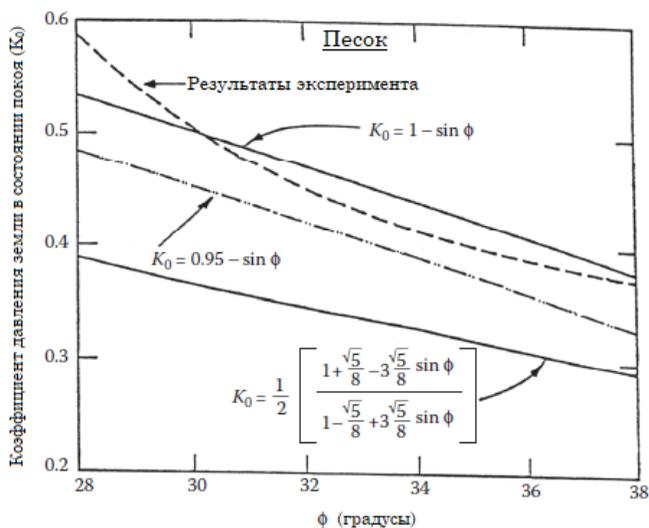


Рисунок 12.11. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов K_0 песка (по Al-Hussaini, M. [1982], Comparison of various methods of determining K_0 , ASTM STP 740, pp. 78–93).

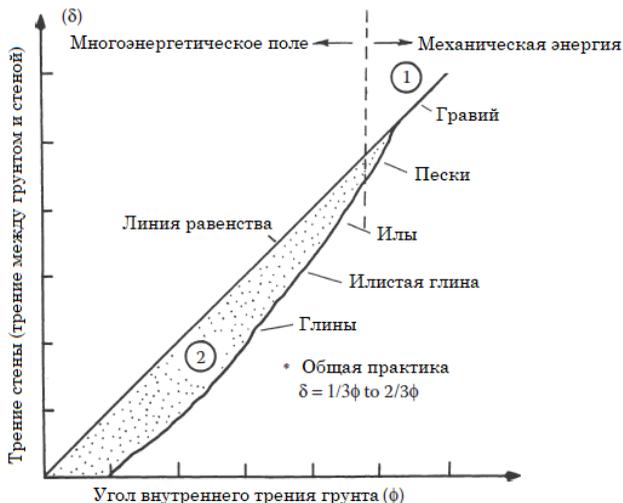


Рисунок 12.12. Угол трения между почвами (φ) в зависимости от угла трения между почвой и стеной (δ).

12.7.2. Угол трения между почвой и стеной

Угол трения между почвой и стеной обычно называют углом трения δ. Тут тот же принцип, что и для угла φ. Используя ту же процедуру, которая описана в предыдущем разделе, за исключением использования двух разных материалов, сравнение углов трения почв (φ) и угла трения между грунтом и стеной (δ) представлено на рисунке 12.13. На рисунке 12.13 видно, что для зернистой почвы эти два угла очень близки, однако для связного грунта угол δ меньше угла φ. Основная причина – мелкозернистая почва, где угол трения при взаимодействии почва–почва более чувствителен к окружающей среде, чем между почвой и материалом стены.

12.8. ФУНДАМЕНТ НА СВАЯХ

12.8.1. Характеристики свай

12.8.1.1. Общее обсуждение

Свайные фундаменты являются одним из основных элементов при улучшении грунта или фундаментных систем. Есть множество книг, отчетов и опубликованных работ, в которых обсуждается эта тема. Однако свайное основание все еще является проблемой, и инженеры-геотехники все еще ищут эффективное решение. Основная причина заключается в том, что механизм взаимодействия почвы и сваи до сих пор не совсем понятен, и трудно предсказать его работоспособность в течение срока полезного использования сваи. Кроме того, местные условия окружающей среды в значительной степени влияют на трение между почвой и свайей, проникновение и конечное поведение. Дальнейшее обсуждение свай в этой главе сосредоточено на экологических аспектах свайных фундаментов.

Сваи – это элементы конструкции, используемые для передачи структурных нагрузок через материал или слой с низкой несущей способностью на элементы из материала с достаточной несущей способностью. Эта передача нагрузки может быть трением, опорой или и тем, и другим, в зависимости от того, противостоит ли нагрузка трением вдоль поверхности сваи или же конец сваи опирается на слой грунта, достаточно сильный для того, чтобы выдерживать нагрузку. Нагрузка, переносимая трением, называется фрикционной свайной нагрузкой, а нагрузка, которую несет твердый слой почвы, называется концевой несущей свайной нагрузкой. Свая, как правило, может использовать как трение, так и опору для изменения нагрузки на конструкцию. Сваи изготавливаются из стали, бетона, дерева или композитных материалов. Сваи изготавливаются в различных формах – бывают круглыми и H-образными.

Структурная нагрузка может быть статической или зависящей от времени, вертикальной или боковой, передаваемой в слой почвы от отдельных свай или групп свай. Фундаменты свай используются (1) для распределения нагрузки, (2) для передачи нагрузки на слой твердой почвы, (3) для противодействия давлению подъема и (4) для противостояния наклонным или боковым нагрузкам. Сваи, как правило, вводятся в грунт путем последовательных ударов по вершине сваи с помощью молотка. Для более эффективных и быстрых способов установки свай использовались методы низкочастотных и высокочастотных вибраторов. Низкочастотный вибратор работает в диапазоне от 5 до 35 циклов в секунду и вырабатывает энергию, поднимая всю сваю и направляя ее вниз на каждом цикле. В высокочастотной (резонансной) вибрационной системе используются генераторы, имеющие рабочий диапазон 40–140 циклов в секунду. Эти генераторы позволяют свае вибрировать на собственной частоте. Основным принципом вибратора для более быстрой установки свай заключается в том, что при вибрации модуль сдвига или вязкость почвы резко снижаются.

12.8.1.2. Выбор типа сваи

Выбор типа сваи и ее принадлежности в основном зависит от условий окружающей среды. Если сваи попадают в морскую воду, экологические соображения включают в себя коррозию морской воды, волновое воздействие, движущийся мусор, лед и воздействие морского бурового скважины. При использовании бетонной сваи сильные химические вещества в воде или в щелочных почвах могут привести к серьезному износу. Если стальная свая используется в электролитической среде вблизи электрических токов, это может повлиять на ухудшение электролиза. Для некоторых регионов важны недорогие энергосберегающие условия; следовательно, использование песка или каменных свай подходит. Использование композитных свай из бамбука и извести для борьбы с оползнями в районах землетрясения является эффективным, и об этом писал Fang (1991c). Типы почв также влияют на выбор типов свай. Сваи, которые будут проходить через препятствия к коренной породе с наименьшим движущим усилием и смещением грунта, будут отдавать предпочтение стальному H-образному своду или свайному трубному свайу. Кроме того, различные типы куч, связанных с окружающей средой, обсуждаются в различных публикациях (Gauffreau 1987; Dismuke 1991).

12.8.1.3. Взаимодействие почвы и сваи в окружающей среде

Механизм взаимодействия в системе грунт–свая аналогичен поведению частиц под нагрузкой, как обсуждалось в разделе 2.8.2. Этот процесс включает потенциальную энергию (энергию положения), кинетическую энергию (энергию движения) и тепловую энергию. Кроме того, как показано на рисунке 12.2, взаимосвязь между зарядом энергии и энергетическим полем аналогична взаимодействию в системе грунт–свая под нагрузкой. Аналогии между процессом забивки свай и энергетическим полем показаны на рисунке 12.14.

12.8.1.4. Сопротивление трению между сваями и почвой

Существуют три основных типа сопротивления трению, которые характеризуют относительное движение частиц грунта во время процесса введения сваи. Сила, необходимая для создания относительного движения, включает такие переменные, как площадь поверхности движения, относительная скорость поверхности движения и расстояние между поверхностью движения. Оценка сопротивления трению между грунтом и сваяй важна для проектирования свайного трения. Рисунок 12.13 может помочь в достижении этой цели.

Отрицательное трение поверхностей – это сила сопротивления вниз на сваю в системе грунт–свая. Обычно такое наблюдается в условиях обезвоживания, потому что снижение уровня грунтовых вод увеличит вертикальное эффективное напряжение. Это вызовет консолидацию осадка, или в случае гранулированного грунта, помещенного поверх слоя мягких глинистых отложений, это вызовет процесс уплотнения в слое мягкой глины и нисходящее сопротивление в системе грунт–свая.

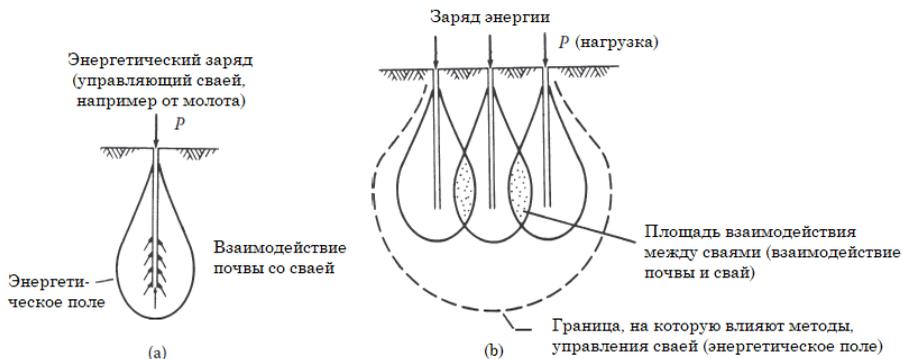


Рисунок 12.13. Взаимодействие почвы и сваи под нагрузкой и сходство между процессом управления сваяй и энергетическим полем: (a) одиночная свая, (b) групповые сваи.

12.8.2. Факторы окружающей среды, влияющие на состояние свай

Существуют многочисленные факторы, влияющие на вбивание свай, включая типы почвы, которые отражаются на когезии, угле трения, а также предполагаемых механизмах разрушения. Однако в полевых условиях действуют дополнительные факторы, такие как колебания грунтовых вод, температура грунта, циклы замерзания–оттаивания, проникновение загрязнений и т. д.

12.8.2.1. Колебание уровня грунтовых вод

Колебания уровня грунтовых вод, связанные с трением поверхностей почвы и свай, показаны на рисунке 12.15. Как обсуждалось в разделах 6.2 и 6.3, уровень грунтовых вод связан с усадкой и набуханием и, следовательно, влияет на трение поверхностей. Усадка и набухание не являются обратимыми процессами, потому что набухание находится под воздействием нескольких энергий, а усадка контролируется только тепловой энергией.

12.8.2.2. Температура грунта и циклы замерзания–оттаивания

Davisson (1970) показывает испытания касательно того, как замерзание грунта влияет на предельное сопротивление емкости свай. Кроме того, как показано на рисунке 12.7, несущая способность грунта значительно увеличивается; следовательно, ворсовая способность в грунтовом состоянии также увеличивается. Характеристики мерзлого грунта обсуждались в разделе 8.7. Фундамент свай в условиях замерзания–оттаивания обсуждается в работе Phukan (1991).

12.8.2.3. Попадание загрязнений и эффект коррозии

Коррозия является одной из важнейших экологических геотехнических проблем. Frye (1970) и Dismuke (1991) измерили потери от коррозии открытой вертикальной мягкой стали в загрязненных условиях. На рисунке 12.16 показана свая, поврежденная загрязненной системой почва–вода.

12.8.2.4. Повреждение свай в процессе ее забивки

В процессе вбивания свай трудно представить, какой тип повреждения в данный момент ей наносится. Проводилось тематическое исследование с использованием Н-свай, вводимых в известняк. Было изучено шесть свай: Н-свая, защищенная точкой Пруина, практически не пострадала от жесткого вбивания в слой известняка, в то время как Н-свая без защиты была повреждена. Fang и Dismuke (1975) рассматривают различные типы повреждений и их причины, как показано на рисунке 12.17.

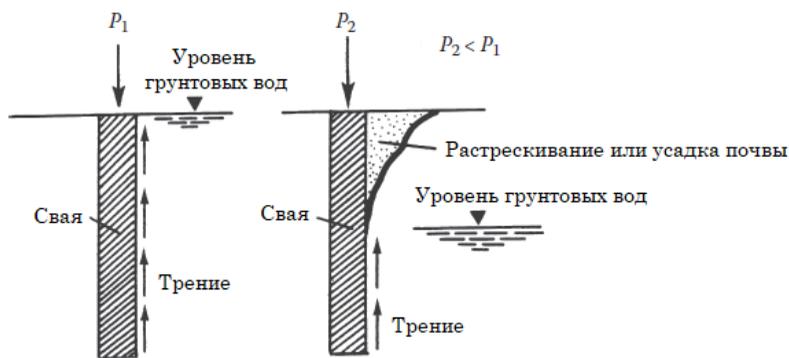


Рисунок 12.14. Влияние уровня грунтовых вод на трение между свайей и почвой.



(a)



(b)

Рисунок 12.15. Фотографии, на которых видны сваи, поврежденные загрязненной системой почва–вода: (а) бетонная свая и (b) стальная свая. (Фото любезно предоставлено Dismuke, T.D.)

12.8.3. Полевая инспекция свайных фундаментов

Многие поломки свай связаны с отсутствием надзора или полевого осмотра. Во время полевого осмотра вся соответствующая информация должна отмечаться и записываться. Перед началом введения свай рекомендуется, чтобы инженер встретился с полевыми инженерами, инспекторами свай и подрядчиками по забивке свай. Инженер обязан следить за тем, чтобы работал только опытный и компетентный персонал и чтобы использованное оборудование соответствовало выполняемой работе. Осмотр свай можно разделить на следующие этапы.

1. Осмотр сваи, когда она готова к введению; он включает осмотр деревянных, бетонных и стальных свай на соответствие спецификациям.

2. Обработка и вбивание свай, что включает в себя осмотр оборудования для вбивания, согласование метода вбивания, фиксирование таких деталей, как перегрузка свай, столкновение с препятствиями, введение вне отвеса, замедление хода, изменения прокладочного материала и последовательность вбивания.

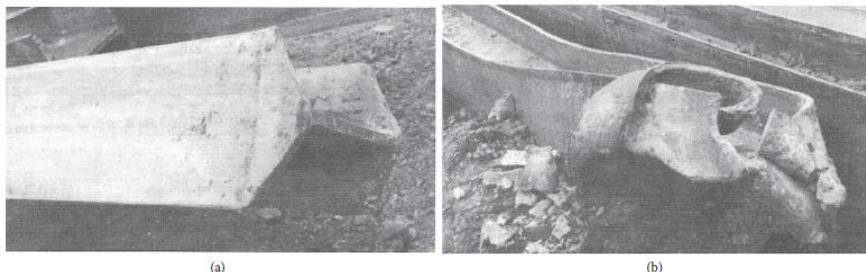


Рисунок 12.16. Повреждение сваи, возникшее в процессе ее забивки: (а) H-образный элемент с защитой и (б) поврежденный H-образный элемент без защиты (Фото любезно предоставили Fang, H. Y. and Dismuke, T. D.).

12.8.4. Особые типы свай и их использование

12.8.4.1. Общее обсуждение

Во многих случаях обычное свайное основание, такое как сталь или бетон, может не подходить из-за местных условий или из-за недоступности материала или его высокой стоимости. В таких случаях следует использовать некоторые недорогие и экономичные сваи. В этом аспекте следует изучить доступность материалов и рабочей силы: (а) недорогие и экономичные сваи, например, песчаные и каменные сваи; карбонатные сваи, мини-бетонные и композитно-бамбуковые сваи; (б) сваи с высокой кислотостойкостью, например, полимербетонные; (с) сваи, используемая для специального применения, например, корневые сваи, шпильки и т. д.

12.8.4.2. Высоко кислотостойкие сваи

Полимербетон показал себя перспективным для использования в качестве основного строительного материала. На основании лабораторных исследований доказано, что прочность полимербетона в три–четыре раза выше, чем обычного бетона с очень высокой коррозионной стойкостью и долговечностью. Полимербетон особенно подходит для районов, характеризующихся высокими проблемами коррозии; это прибрежные городские районы с проблемами проникновения соленой воды (раздел 14.4).

В прошлом сваи, сделанные из цемента, были сильно подвержены коррозии в морской воде и изгибанию и имели тенденцию становиться очень тяжелыми при высоких требованиях к стальной арматуре. Полимербетонные сваи были признаны весьма подходящими для такой конструкции, и было показано, что они удовлетворяют всем требованиям и условиям. Япония уже производит полимербетонные сваи для строительства прибрежных сооружений и морских барж.

12.8.4.3. Сваи, используемые в особых условиях

В последние годы появилось много новых типов или новых форм свай из различных материалов для коммерческого использования. Сюда относятся корневые сваи, шпильки, мини-бетонные сваи, известковые сваи и т. д. «Корневые сваи»® представляют собой монолитные железобетонные сваи малого диаметра, используемые для укрепления зданий и для формирования трехмерных подземных подпорных и стабилизирующих конструкций. Система корневых свай – это фундаментная структура, похожая на корни дерева. Система формируется методом вращательного бурения через существующую конструкцию до заданного уровня глубины. Каждая свая надежно скрепляет два основных компонента – структуру и почву.

Штифтовая свая – это короткая свая меньшего диаметра. Она используется для защиты горных склонов от разрушения.

12.8.4.4. Сваи, изготовленные из отходов или побочных продуктов

Существует множество типов свай из отходов или побочных продуктов, таких как твердые отходы (мусор) или отработанные резиновые шины. Некоторые из этих типов свай, изготовленной из отходов, будут дополнительно обсуждены в разделе 17.10.

12.9. ПРОБЛЕМЫ ПОДВОДНЫХ ФУНДАМЕНТОВ

Проблемы подводных фундаментов тесно связаны с условиями окружающей среды, такими как степень загрязнения вод, глубина воды, наличие течений и т. д. В этом разделе основное внимание уделяется подводному обследованию и ремонту мостовых оснований и фундаментов.

12.9.1. Подводная инспекция силовых конструкций

1. *Подготовка.* Подводная инспекционная группа должна быть знакома со строительством объектов и условиями на месте до начала инспекции. Правильное планирование и подготовка сэкономят много времени в полевых условиях и помогут прийти к более точному результату. Инспекционная группа должна знать график инспекций, тип инспекции и процедуру инспекции (Lamberton и соавторы, 1981; Brackett и соавторы, 1982).

2. *Очистка.* Почти всегда требуется очистить подводные структуры от характерных загрязнителей для облегчения осмотра и выявления недостатков. Обычные проверки, когда нет информации о дефектах, как правило, требуют лишь легкой очистки в отдельных областях, тогда как подробные проверки могут потребовать полной очистки определенных элементов конструкции.

3. *Визуальный осмотр.* Это основной метод, используемый для проверки подводной части структур. Наиболее очевидным ограничением визуального осмотра является непрозрачность воды. Например, мосты во многих случаях строятся в мутной воде, в которой степень видимости изменяется от плохой до нуля. Когда мутность высокая, видимость под водой может отсутствовать, даже если дайвер имеет искусственное освещение; прямой свет отражается от мути и видимость уменьшается. Видимость может быть улучшена, если к лицевой панели водолазного снаряжения прикрепить маску с чистой водой. Пластиковые пакеты с чистой водой могут быть использованы в качестве линз для осмотра Н-

свай и свай других неправильных форм. Специальная доска для дайвера полезна для создания заметок и зарисовок под водой.

4. *Тактильный осмотр.* Планирование тактильных осмотров требует большей подготовки, чем в случае работы в чистой воде. Следует обратить внимание на (1) хорошую связь между водолазом и теми, кто остался на поверхности; (2) использование метода стабильного контроля и других методов, не зависящих от зрения или осязания; (3) расширение использования зондирующего оборудования для обнаружения грязи и скопления мусора; (4) рекордер для документирования голосовых передач; (5) определение положения и глубины погружения.

12.9.2. Обслуживание и ремонт подводных сооружений

После завершения подводного осмотра в дело вступают бригады технического обслуживания и ремонтные бригады. Необходимым условием для обслуживания или ремонта подводной конструкции является понимание того, что вызвало нынешнее состояние. Часто подводное повреждение или разрушение связано с местными условиями окружающей среды. Недостатки конструкции могут привести к необходимости технического обслуживания и ремонта подводных сооружений. Продолжающаяся деградация или ухудшение могут потребовать расследования, чтобы полностью понять причину происходящего ухудшения, почему и как это происходит, и выявить скорость негативного процесса.

12.9.2.1. Профилактика

Профилактика является одним из важных факторов контроля ущерба подводным сооружениям. Среди этих факторов наиболее важен выбор правильных материалов. Мы уже приводили в качестве примера полимербетон. Применение полимербетона в области геотехнического машиностроения, а также для покрытия автодорог, взлетно-посадочных полос аэродрома, гидротехнических сооружений и т. д. обсуждалось многими исследователями. В этом разделе рассматривается использование системы полимербетона в подводных сооружениях.

Полимербетонная система обладает высокой прочностью, превосходной абразивной стойкостью, стойкостью к химическому воздействию и процессам заморозания–оттаивания, непроницаемостью и низкой адгезией к льду и считается подходящим материалом для строительства конструкций на морском дне. Полимербетонные баржи и многоцелевые понтоны, уже производятся, также продемонстрировали высокую долговечность, простоту в обращении и низкую стоимость, демонстрируя при этом универсальность: они могут использоваться для досуга, эксплуатации природных ресурсов и строительных работ.

12.9.2.2. Методы защиты от коррозии и технический ремонт

Типичными профилактическими процедурами являются нанесение защитного покрытия, применение электрических методов и реагирование на изменение окружающей среды. Краткое описание каждого метода представлено ниже. Защитное покрытие образует барьер между металлом и окружающей средой, тем самым удаляя электролит из системы. Коррозия не может происходить только при наличии катодов и анодов, она еще нуждается в электролите. Хорошее защитное покрытие должно противостоять кислотам, щелочам, солям, влаге и ультрафиолетовым лучам. Органические покрытия, вероятно, являются наиболее

известными средствами контроля коррозии металлов и включают относительно тонкий барьер между материалом подложки и окружающей средой. Наиболее распространенными являются краски, смолы и пластики. Электрический метод предотвращения коррозии включает в себя катодную и анодную защиту и электрическую изоляцию. Сводная информация о методах защиты от коррозии и ремонта свай представлена в таблице 12.1. Геотекстиль часто используется для борьбы с эрозией береговой линии или для ремонта конструктивных элементов, таких как опоры мостов и свайные фундаменты. Подробные процедуры установки для различных применений, относящихся к прибрежным сооружениям, приведены Коетгер (1994).

12.10. ПРОЦЕССЫ УКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТА И ЗАДЕЛКИ ТРЕЩИН

12.10.1. Общее обсуждение

Методы цементации или нагнетания часто используются для герметизации трещин, остановки утечек, укрепления некоторых типов геоструктур, таких как грунтовые анкеры или грунтовые гвозди, или для ремонта подземных сооружений из-за повреждения в результате землетрясения или по другим причинам. Совсем недавно применение этого метода было расширено и теперь включает средства контроля или хранения опасных или токсичных отходов. Независимо от цели использования этого метода рабочий процесс всегда находится в ситуации, заключающейся в наличии сложных условий. Например, в качестве распространенной ситуации следует рассматривать возможность перекрытия кислотного дренажа из шахт или утечки филтраты из резервуаров с опасными или токсичными химическими веществами. Материал, используемый для затирки, называется *затиркой*. Затирка может представлять собой чистые растворы, коллоидные растворы или бингамовские суспензии. Существует два основных типа раствора, один из которых получен из силиката натрия, а другой – из водных смол. Их основным свойством является водонепроницаемость, так как их задача – укрепление структуры почвы. Растворы находятся в жидкой форме, поэтому они могут проникнуть в пустоты почвы, но через определенное время они должны превратиться в твердое вещество. Этот период времени, необходимый для превращения жидкости в твердое вещество, называется временем гелеобразования. Выбор подходящего раствора является функцией кривой градации размера частиц почвы, подлежащей обработке. В таблице 12.2 представлен тип почвы, подлежащей обработке, и типы растворов, которые будут использоваться.

Таблица 12.1. Техника ремонта свай и защиты их от коррозии.

	Защита от коррозии
Покрытия ¹	
	Гидрофобные
	Сухая пленка
Барьеры ²	
	Покрытие (бетон)
	Пластик (жесткий)
	Пластик (гибкий)
	Пластиковая оболочка и мастичный эпоксидный наполнитель
	Обшивка (Monel® и т. д.)

Катодный³
 Впечатленный ток
 Гальванические аноды

Структурный ремонт

Замена раздела
 Сварка
 Болтинг (сверло и воронка или взрывчатка)
 Дополнительные разделы²
 Сварка
 Болтинг (сверло)
 Структурная оболочка²
 Укладка сухого бетона
 Укладка мокрого бетона

¹ Требуется пескоструйной обработки поверхности для большинства покрытий.

² Обычно не требует пескоструйной обработки поверхности – достаточно использования ручных скребков.

³ Не требует подготовки поверхности свай; для существующих опор заземляющие кабели устанавливаются при использовании систем с подаваемым током.

Источник: основано на данных Dismuke, T. D. (1991), *Foundation Engineering Handbook*, 2nd ed. Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 856–867.

12.10.2. Процесс цементации и взаимодействие: грунт–цемент

12.10.2.1. Затирка и инъекционные процессы

Затирка – это процесс, протекающий между почвой и цементом. Расстояние между двумя соседними поверхностями для затирки обычно составляет около 50 см. Среди методов, используемых для цементации, наиболее распространенным является метод Езерского-Йоостена. Этот метод состоит в закачке концентрированного силиката натрия (цементного раствора) через первое отверстие (грунт) и раствора хлорита кальция через соседнее отверстие. У метода Езерского-Йоостена есть два недостатка: первый – более высокое давления цементации, а второй – трудность для достижения полной эффективности.

Таблица 12.2. Типичные виды растворов, используемых для различных типов почв

Тип почвы	Характеристики почвы	Тип раствора	Пример
Аллювиальные и грубые пески	$d_{10} > 0,5$ мм $S < 100$ см ⁻¹ $K > 10^{-3}$ м/с	Бингамские суспензии	Цементный раствор
Средние и мелкие пески	d_{10} от 0,02 до 0,5 мм	Коллоидные растворы	Силикагель или лигнохромные гели
			Побочные продукты танинов
	S от 100 до 1000 см ⁻¹ K от 10 ⁻³ до 10 ⁻⁵ м/с		Ненасыщенные вулканизруемые масла Органические или минеральные коллоиды
Илистые или глинистые пески	$d_{10} < 0,02$ мм	Чистые растворы	Фенопласты
Илы	$S > 1000$ см ⁻¹		Аминопласты
	$K < 10^{-5}$ м/с		Акриламид

Источник: данные из: Caron, C. (1976), *New Horizons in Construction Materials*, Envo Publ. Co., Bethlehem, PA, pp. 237–247.

12.10.2.2. Взаимодействие грунт–цемент

Если раствор, впрыскиваемый в мелкозернистую однородную почву, (а) слишком густой, то он может оставаться на поверхности почвы, а если он (б)

слишком жидким, тогда большая часть жидкого раствора стекает под действием силы тяжести. Некоторые жидкие растворы, такие как силикагель, превосходны для мелкозернистой почвы, но не подходят для грубой почвы из-за синерезиса (Caron, 1976). В гетерогенной почве, по мере того как происходит закачка, шлам должен все больше и больше проникать из-за постепенного снижения проницаемости почвы. Логическая процедура затирки и взаимодействие грунта с затиркой должны учитывать реологическое поведение в энергетическом поле нескольких сред.

12.10.3. Затирка, используемая для контроля опасных или токсичных отходов

12.10.3.1. Общее обсуждение

При анализе процесса затирки мы всегда предполагаем, что:

1) затирка должна быть достаточно текучей, чтобы проникать как в почву, так и в пустоты и трещины в почве;

2) затирка должна оставаться в почве, не подвергаясь воздействию каких-либо физико-химических условий, которые впоследствии будут применяться к грунтовой почве. Ввиду различных требований и соображений существуют значительные различия между этими двумя условиями, допущениями и условиями *in situ*, поэтому часто происходят преждевременные или неожиданные разрушения. Чтобы понять взаимодействия раствора с окружающей средой в условиях *in situ*, необходимо изучить взаимодействия загрязняющих веществ с раствором.

12.10.3.2. Затирочная система для контроля опасных или токсичных отходов

В 1984 году в Национальных лабораториях Ок-Риджа была начата программа по разработке ряда смешанных сухих почв на основе цемента, которые при смешивании с конкретными отходами производили цементные растворы, которые при обработке соответствовали бы нормативным требованиям и имели свойства, сохраняющиеся в течение длительного времени. Отходы, используемые в качестве раствора, состоят из концентрированного солевого раствора, содержащего 73 % воды, 12 % NaOH, 6 % NaNO₃ и меньшее количество других материалов. Вода вводится в жесткие материалы затвердевшего раствора, который образует физический барьер для выброса компонентов отходов в окружающую среду путем капсулирования отходов.

Отходы состоят из многовалентных катионов, которые в основном являются нерастворимыми гидроксидами или карбонатами, pH которых выше 13. Вяжущий материал в цементном растворе поддерживает этот высокий pH, что приводит к снижению подвижности этих видов. Некоторые ионы металлов также включены в кристаллические структуры минералов, образующихся в процессе отверждения. Осаждение и включение в матрицу тяжелых металлов и других многовалентных катионов в цементной матрице обеспечивает сохранение токсичных материалов в жидком растворе. Для получения более полных сведений о системе затирки для контроля опасных или токсичных отходов см. работы Bodocsi и соавторов (1988), Weaver и соавторов (1990).

12.11. РЕЗЮМЕ

1. Учет факторов нагрузок, в том числе нагрузок со стороны окружающей среды, позволяет предугадать возможные будущие проблемы проекта, а это может привести к созданию более экономичных и безопасных фундаментных конструкций.

2. Расчетное условие для конструкции, а также фундаментов должно быть предельным для состояния разрушения, а не допустимым или рабочим состоянием. Фактор безопасности должен учитывать местные условия окружающей среды.

3. Обсуждаются и сравниваются механизмы взаимодействия почвы с конструкцией и конструкции с почвой.

4. Химические растворы используются только в качестве средства для ремонта после обнаружения разрушения. Не существует стандартной процедуры для цементации – каждый случай должен изучаться индивидуально в условиях *in situ*.

ПРОБЛЕМАТИКА

12.1. Обсудите механизмы воздействия в системах почва–сооружение и сооружение–почва.

12.2. Сооружение с параметрами основания 10 футов × 10 футов × 3 фута было построено на поверхности грунта – мягкой глины с когезией = 500 фунтов на квадратный дюйм и удельным весом 100 фунтов на фут. В качестве инженера проекта вас просят быстро на месте оценить максимально допустимую несущую способность для коэффициента безопасности 3, чтобы учесть изменение нагрузки для фундамента. Как вы оцениваете допустимую несущую способность? Объясните и обоснуйте выбор процедуры.

12.3. Что такое «предполагаемое давление опоры»? Что такое «фактор безопасности»?

12.4 При каких условиях оправданы сваи для сокращения консолидации? Объясните утверждение, что неправильное использование свай может вызвать больше проблем с фундаментом, чем если бы сваи не использовались вообще.

12.5. Объясните, почему формулы забивки свай не подходят для определения нагрузки, которую может выдерживать свая при использовании в глинах (от мягкой до средней жесткости).

12.6. Группу несущих свай вбивали до тех пор, пока они не встретили препятствие на четко очерченном горном пласте. Сваи были близко разнесены. Однако при погружении было обнаружено, что многие из свай сильно оседают, причем самое крупное оседание происходило под сваями, которые были вбиты первыми. Объясните, почему.

12.7. Использование геотекстиля является довольно новым подходом в фундаментостроении, но до сих пор было проведено сравнительно небольшое количество исследований по его сравнению с другими материалами. Тем не менее он быстро набирает популярность. (а) Объясните, почему, и (б) обсудите основные способы применения геотекстиля в фундаментостроении.

13. Проблематичные почвы и горные породы

13.1. ВВЕДЕНИЕ

Как обсуждалось в главах 1 и 3, некоторые природные системы почва–порода наследуют слабости от исходного материала. К таким материалам относятся выветривающиеся породы, остаточные почвы, глинистые сланцы, дисперсионные глины, складывающиеся илы, растворимые карбонатные породы, обширные глины и органические почвы. Эти типы почв имеют высокую сжимаемость, низкую прочность на сдвиг и очень чувствительны к местным условиям, особенно к воде, а также вызывают чрезмерную эрозию, чрезмерное оседание грунта, разрушение склонов и оползни. Поскольку у этих типов систем почва–порода есть специальные особенности, они заслуживают особого внимания. В этой главе мы обсудим инженерные свойства этих типов грунтов и пород в связи с различными анализами и проектированием геотехнических проектов. Обсуждение будет касаться происхождения, распределения и типичных геотехнических свойств, а также методов изменения слабых свойств для следующих почв и пород:

- сланцы и выветренные породы;
- остаточный грунт;
- набухающая глина;
- органическая почва (болотная, торфяная и т. п.);
- карстовый район (провал);
- лесс (выдувной ил);
- дисперсионная глина;
- латеритная почва;
- аллювиальные и озерные отложения;
- солонцевато-солончаковые почвы;
- бентонит и другие.

13.2. СЛАНЦЫ И ВЫВЕТРЕННЫЕ ПОРОДЫ

13.2.1. Общее обсуждение

Сланцы преобладают в земной коре среди осадочных пород. Их свойства варьируются от свойств «твердой» породы, которая должна быть взорвана для раскопок, до свойств материалов, подобных почве, которые подпадают под инженерное определение грунта, о чем писал Underwood (1967). Различают уплотненные почвоподобные сланцы, в которых связующий материал является, по существу, водным веществом, даже если оно присутствует только в очень небольших количествах, и цементированные камнеобразные сланцы, в которых компоненты в виде частиц могут цементироваться известняковыми, кремнистыми, железистыми, гипсовыми пластами, фосфатными или другими связующими агентами или могут быть соединены вместе путем перекристаллизации. Химическая природа связующих веществ обычно может быть определена с помощью простых полевых или лабораторных испытаний.

13.2.2. Камнеподобные и почвоподобные сланцы

Камнеподобные сланцы обычно сохраняют свою прочность и целостность даже во время повторяющихся циклов смачивания и сушки, в то время как *почвоподобные сланцы* ослабляются в этих условиях. Время, необходимое для размокания стандартизированных образцов, размер и характер размокших частиц, а также общая картина размокания представляют ценные подсказки в отношении инженерного поведения сланцев, так же, как и для почв.

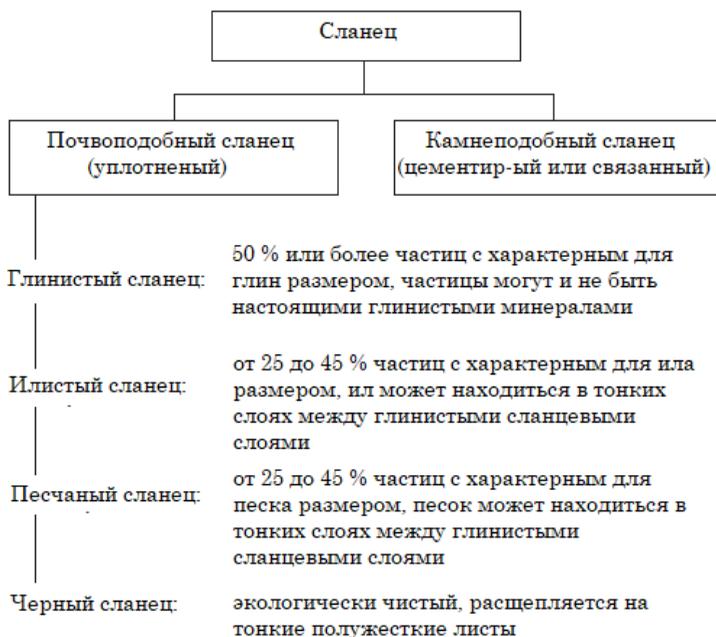
Влияние на технические свойства почвоподобных сланцев таких физических, физико-химических и химических факторов, как размерный состав зерен, минеральные ассоциации, типы и количества обменных ионов, химический характер электролитов в поровой воде и т. д., носит тот же характер, что и их влияние на нормальные почвы. Представленные здесь соображения будут сосредоточены на тех факторах, которые придают почвоподобным сланцам их отличительные характеристики. Важными из них является способ разрушения и способность разделяться. Ingram (1953) выделяет три доминирующих типа характеристик разрушения: массивный, флагманский и слоевой. Массивную структуру и возникающий режим разрушения можно ожидать от отложений преимущественно ила или частиц более крупного размера в пределах ограниченного диапазона размеров, которые не претерпели заметного сдвигового смещения при развитии и уплотнении породы.

Характеристики делимости или расщепления возрастают с увеличением содержания минералов пластинчатой формы (глин и слюды) в параллельном расположении из-за способа осаждения и давления вскрыши. Тектонические нарушения могут уменьшать параллельный порядок и, следовательно, степень деления. Влияние органического вещества и других факторов зависит от степени, в которой они способствуют или препятствуют параллельному расположению пластинчатых минеральных компонентов. Чем выше степень деления, тем больше изменение в зависимости от направления таких физических свойств, как модуль упругости, прочность при растяжении, сжатии и сдвиге, а также теплопроводность и гидравлическая проводимость. В таблице 13.1 представлена техническая классификация почвоподобных сланцев, которую предложил Mead (1936).

13.2.3. Технические свойства сланцев

Пористость, коэффициент пустотности и степень упорядоченности сланца зависят от его минерального и гранулометрического состава, способа осаждения, его истории напряжений и деформаций, его химической истории и продолжительности воздействия различных условий окружающей среды. В других сопоставимых условиях соотношение пустот уменьшается с увеличением диапазона размеров частиц. Пористость и соответствующие доли пустот в сланцах могут варьироваться от 3 % до 52 % и от 0,03 до 1,07 соответственно; содержание влаги от менее 5 % до 35 % для некоторых глинистых сланцев. Сланцы называются насыщенными, если их поры полностью заполнены водой, хотя они могут обладать дополнительным водозабором и способностью набухать. Что касается гидравлической проводимости, набухания, усадки, консистенции и связанных свойств, сланцы подчиняются тем же основным законам, что и почвы.

Таблица 13.1. Классификация почвоподобных сланцев.



Источник: по Mead, W. J. (1936), Trans. 2nd Int. Congress on Large Dams, v. 4, p. 183.

Выветрившиеся сланцы

Содержание влаги *in situ* = 19.0%

Сухая плотность = 1.75 t/m³

Индекс пластичности = 20.9

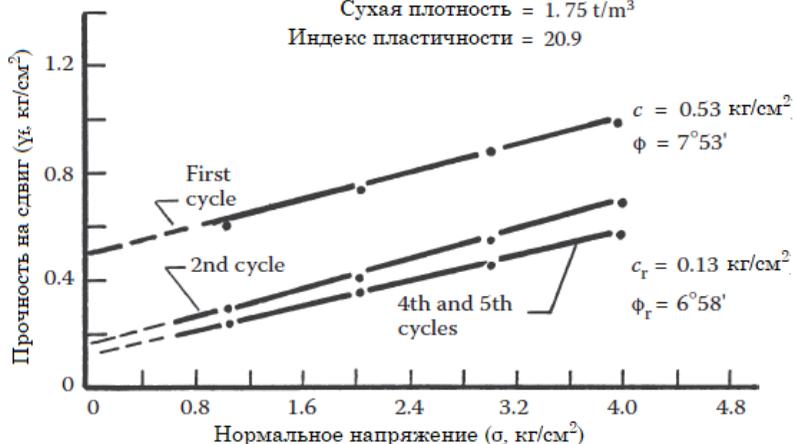


Рисунок 13.1. Остаточная прочность на сдвиг выветрившегося сланца определяется путем повторных испытаний на прямой сдвиг (по Tianjin Univ. [1978], Soil Mechanics and Foundation Engineering, Chinese Construction Publ., Beijing).

Прочность сланцев уменьшается экспоненциально с увеличением доли пустот и содержания воды. Для цементированных сланцев это зависит от прочности цементирующего материала и отношения его объема к объему пор. Часто наблюдаются большие различия между прочностью на месте и упругими константами сланцев и результатами, полученными в лабораторных испытаниях. Факторами, способствующими появлению таких различий, являются:

- 1) неправильная или неадекватная выборка;
- 2) нарушение сланцевой структуры;
- 3) разница в стрессовых условиях;
- 4) в особенности отскок в сверхконсолидированных отложениях, где выделение энергии деформации может разрушить более слабые связи и позволить воздуху проникнуть в расширенное поровое пространство.

Понижение прочности происходит даже тогда, когда отскок происходит в воде при предотвращении попадания воздуха. Veess и Winterkorn (1967) обнаружили большие различия в сопротивлении сдвигу других глин, таких как каолиновые и аттапульгитовые глины, при том же содержании насыщенных пустот и одинаковом нормальном давлении между первичными образцами и другими, которые ранее были чрезмерно уплотнены с последующим сбросом давления и повторным уплотнением при наличии воды. Остаточная прочность на сдвиг выветрившихся глинистых сланцев определяется с помощью повторных испытаний на прямой сдвиг, как показано на рисунке 13.1. Числа циклов во время испытаний на сдвиг существенно влияют на параметры остаточной прочности на сдвиг (c_r , ϕ_r), как показано на рисунке 13.1.

13.3. ОСТАТОЧНЫЕ ПОЧВЫ

13.3.1. Характеристики остаточных почв

Остаточная почва образуется в результате разложения *in situ* подстилающей породы и воздействия соответствующих почвообразующих факторов, таких как микроклимат, флора, фауна и геометрические особенности. Химический распад особенно активен в жарких и влажных регионах с образованием и разложением большого количества органических материалов. Распределение остаточной почвы и выветривание пород обычно происходит при влажных температурах тропического климата.

Физическая структура и инженерные свойства остаточных почв уникальны. Текстура и минералогия могут по-прежнему отражать первоначальную структуру породы, которая тем сложнее, чем меньше выветривание, то есть с увеличением глубины залегания. Описание профиля выветривания дали Deere и Patton (1971). Классификация степеней выветривания представлена в таблице 13.2. В таблице 13.3 представлено сравнение инженерной классификации профиля выветривания и остаточного грунта для магматических и метаморфических пород. Существуют четыре классификации, разработанные в работах Vargas (1953), Sowers (1976), Deere и Patton (1971) и Martin (1977). Каждая классификация имеет пять подгрупп – по типам пород, остаточным горизонтам почв, распадающемуся слою пород и неразрушающимся породам, как показано в таблице 13.3.

Таблица 13.2. Классификация степеней выветривания.

Класс	Степень разложения	Полевое опознание	Технические свойства
VI	Почва	Нет узнаваемой текстуры породы; поверхностный слой содержит гумус и корни растений.	Не подходит для фундамента; нестабильна при разрушении растительного покрова.
V	Полностью выветрившаяся	Горная порода полностью разложилась под воздействием атмосферных воздействий, но текстура все еще узнаваема; в видах гранитного происхождения оригинальные полевые шпаты полностью разлагаются на глинистые минералы; не могут быть извлечены как керны обычными методами бурения.	Может быть выкопана вручную или раздроблена без использования взрывчатых веществ; не подходит для фундаментов бетонных плотин или крупных сооружений; может подходить для фундаментов земляных плотин и для заливки; неустойчива в измельченном состоянии; требует защиты от эрозии.
IV	Сильно выветрившаяся	Горная порода ослаблена, так что довольно большие куски могут при небольшом усилии рассыпаться в руках; иногда извлекается в качестве керна при тщательном алмазном бурении; окрашена лимонитом.	Аналогично классу V.
III	Умеренно выветрившаяся	Значительно выветрившаяся; обладает некоторой прочностью – большие куски (например, бурильная колонна NX) не могут быть сломаны вручную; часто окрашена лимонитом.	Без применения взрывчатых веществ раскопки ведутся с трудом; в основном дробится под бульдозерными гусеницами; подходит для фундаментов небольших бетонных конструкций и насыпных отвалов; может подойти для полупроницаемой заливки; стабильность в измельченном состоянии зависит от структурных особенностей.
II	Слегка выветрившаяся	Отчетливо выветривается по всей структуре, с небольшим окрашиванием лимонитом; часть разложенного полевого шпата в гранитах; прочность приближается к силе свежего гранита.	Требуется взрывчатка для раскопок; подходит для бетонных оснований плотин; очень проницаемый через открытые суставы; не очень подходит как конкретный заполнитель.
I	Свежая горная порода	Сразу под выветрившейся горной породой; свежий камень может иметь некоторые лимонитонитовые швы.	Окрашивание указывает на протекание воды вдоль суставов; отдельные детали могут быть незакрепленными, а в туннелях и шахтах может потребоваться поддержка.

Источник: по Little, A. L. (1967), Laterites, Proc. 3rd. Asian Regional Conf. on SMFE, Haifa, v. 2, pp. 61–71.

Таблица 13.3. Сравнение инженерной классификации профиля выветривания и остаточной почвы для эффузивных и метаморфических пород.

Vargas (1953)	Гнейсовый базальтовый песчаник	Естественная остаточная почва	Молодой остаточный грунт	Разрушенный слой породы	Твердая горная порода
Sowers (1963)	Магматическая и метаморфическая порода	Верхняя зона	Промежуточная зона	Частично выветрившаяся зона	Не выветрившаяся порода
Deere и Patton (1971)	Магматическая и метаморфическая порода	IA–A-горизонт	IB–B- горизонт IC–C- горизонт	Перемещение остатка. Часть выветренной породы	Не выветрившаяся порода
Martin (1977)	Магматическая и метаморфическая порода	Остаточный грунт	Остаточный грунт	Разрушенная порода	Горная порода

Источник: по Martin, R. E. (1977), J. Geotech. Eng. Div. Proc. ASCE, v. 103, no. GT3, pp. 197–212.

13.3.2. Техническое поведение остаточных почв

Физическая структура и инженерные свойства остаточных почв уникальны. Текстура и минералогия могут по-прежнему отражать первоначальную структуру породы, которая тем сложнее, чем меньше выветривание, то есть с увеличением глубины залегания. Как сообщает Sowers (1963), остаточные почвы имеют внутренний угол трения и когезию, которые зависят от отношения пустот и степени насыщения; они сильно анизотропны, как и другие свойства. Описание профиля выветривания для магматических и метаморфических пород суммируется и показывает относительную проницаемость и прочность каждого профиля (Deere и Patton, 1971). Типичные значения коэффициента проницаемости варьируются от $0,1 \times 10$ до 5×10 см/с. Описание профиля выветривания и параметров прочности на сдвиг, а также угла внутреннего трения различных выветривающихся пород, остаточных грунтов и связанных с ними материалов приведены в таблиц 13.4а и 13.4б.

13.3.3. Влияние окружающей среды на остаточные почвы

Остаточные почвы чувствительны к поровым жидкостям. На рисунке 13.2 показана остаточная почва, полученная из разложившейся гранитной породы с острова Гонконг, в зависимости от степени насыщения, что указывает на значительное влияние на спаянность, когда степень насыщения увеличивается как для образцов с нарушенной структурой, так и для почвы, не подвергавшейся влиянию. На рисунке 13.3 показано влияние поровой жидкости и удельного веса на гранулометрический состав. При одинаковом удельном весе ($G_s = 2,87$) рН уменьшается, а значение D_{60} увеличивается.

13.4. НАБУХАЮЩИЕ ГЛИНЫ

13.4.1. Общее обсуждение

Почвы, которые демонстрируют наибольшее изменение объема от сухого до влажного состояния, обычно содержат значительный процент монтмориллонитовой глины или связанных с ней трехслойных глинистых минералов (таблица 3.10). Набухающие и усаживающиеся почвы не имеют сплошного зернистого каркаса с достаточной пористостью, это позволяет учесть изменения объема фракций илистой глины из-за увеличения или уменьшения содержания влаги. В уплотненных почвах наличие или отсутствие эффективного каркаса может быть выведено из размерного состава почвы и пределов Аттерберга фракционных сит № 40 или № 200.

Таблица 13.4а. Описание и параметры прочности на сдвиг остаточной почвы и выветрившихся горных пород.

	Зона	Описание	Относительная проницаемость	Относительная сила
I Остаточный грунт	IA-A-горизонт	Верхняя почва, корни, зона органического материала выщелачивания и элюирования могут быть пористыми.	От среднего до высокого	От низкой до средней
	IB-B-горизонт	Характерна обогащенная глина; также накопления Fe, Al и Si, следовательно, может быть цементирован.	Низкий	Обычно низкая (высокая, если при цементации)
	IC-C-горизонт (сапролит)	Сохранились реликтовые породы. Иловая сортировка к песчаному материалу. Менее 10 % основных камней. Часто слюдястый.	Средняя	От низкой до средней (реликтовые структуры очень значительны)
II Выветрелая порода	IIA-перенос (от остаточной почвы или сапролита к частично выветрившейся породе)	Сильно изменившаяся, почвоподобная или камнеподобная. Мелкозернистый или крупнозернистый песок от 10 до 95 %. Распространено сфероидальное выветривание.	Высоко	От средней до низкой, где присутствуют слабые и реликтовые структуры
	IIb – частично выветренная порода	Мягкая и тяжелая горная порода. Суставы окрашены, изменены. Есть изменения полевых шпатов и слюд.	От среднего до высокого	От средней до высокой
III Невыветрелая порода	Нет железных пятен, чтобы проследить вдоль суставов	Нет выветривания полевых шпатов и слюд.	От низкого до среднего	Очень высокая

Однако в засушливых районах существуют природные почвы с высоким содержанием песка и илистой глины с такой структурой, что фракция илистой глины образует мостики между рыхлыми песчинками. Если такие почвы подвергаются воздействию воды, связующие мосты ослабляются, и почва может разрушиться под действием собственного веса или наложенных нагрузок. Это иллюстрирует важность структурных особенностей, помимо гранулометрических и объемных связей при взаимодействии твердых веществ почвы с водой.

13.4.2. Влияние факторов на набухание

Общая степень набухания почвенного тела, обычно выражаемая в процентах от его первоначального объема, представляет собой разницу в сумме фазовых объемов твердых, жидких и газообразных компонентов почвы в начальном и конечном состояниях. Принимая во внимание объем твердых компонентов в качестве газообразных компонентов, далее мы указывает факторы, влияющие на изменение объема набухающих глин.

1. Размер зерна, состав и плотность почвы.
2. Количество, минеральный характер и обменный ион глинистой фракции.
3. Типы и концентрация электролитов в почвенном растворе и в источнике набухающей воды.
4. Количество и содержание электролитов в системе почва–вода.
5. Структура почвы под влиянием истории химических реакций и напряжения–деформация.
6. Влияние температуры и давления, включая эффект перегрузки.

Таблица 13.4б. Параметры прочности на сдвиг.

Тип горной породы	Степень выветривания	Параметры прочности	
		c	ϕ
Гнейс (слюдистый)	Мурам (зона IV)	$c = 0,6$	$\phi = 23$
	Разложенный	$c = 0,3$	$\phi = 37$
Гнейс	Зона IC	–	$\phi = 18,5$
	Зона разлома	$c = 1,5$	$\phi = 27$
	Сильное разложение	$c = 4,0$	$\phi = 29$
	Выветрившийся (зона IC)	$c = 0,35-0,45$	$\phi = 15-18$
Сланец		$c = 0,48-0,70$	$\phi = 15-21$
	Выветрившийся	$c = 0$	$\phi = 30$
Филлит	Разложенный	$c = 0,5-1,2$	$\phi = 10-22$
Мергель верхнего триаса	Сильно выветрившийся	$c < 0,1$	$\phi = 25-32$
		–	$\phi_r = 18-24$
Кварцевый диорит	Разложенный	$c = 0,1$	$\phi > 30$
Кварцит	Разложенный	$c = 0,15$	$\phi = 35$
	Разложенный	$c = 0$	$\phi = 27-31$
Гранит	Зона IV		$\phi = 28$
	Зона IC		$\phi = 35$
	Мелкое зерно		$\phi = 25,5-34$
	Грубое зерно		$\phi = 36-38$
	Разложенный	$c = 0,6-1,4$	$\phi = 8-18$
Гранитно-гнейсовый грунт	Натуральный	$c = 0,1-0,2$	$\phi = 25-35$
	Насыщенный	$c = 0-0,2$	$\phi = 30-35$
Черные швы	Зона IC	–	$\phi_r = 10,5-14,5$
Диорит	Подвергнутый атмосферным воздействиям	$c = 0,3$	$\phi = 22^\circ$
Риолит	Разложенный	–	$\phi = 30^\circ$

Примечание: c , ϕ – когезия и угол трения; c' , ϕ' – эффективная когезия и эффективный угол трения; ϕ_r – остаточный угол трения; c , $c' = \text{кг/см}^2$; ϕ , ϕ' , ϕ_r – степень.

Источник: по Deere, D. U. and Patton, F. D. (1971), Proc. 4th Panamerican Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering, v. 1, pp. 87–170; и другие.

13.4.3. Идентификация и классификация набухающих глин

13.4.3.1. Методы единого индекса

USBR использует содержание коллоида (в процентах $< 0,001$ мм), индекс пластичности (PI) и предел усадки (SL) в качестве критериев для идентификации экспансивных глин, как показано в таблице 13.5. Поскольку соответствующие пределы Аттерберга обычно определяются на почвах, а коллоидное содержание определяется довольно легко, этот метод должен быть предпочтительнее методов с одним индексом.

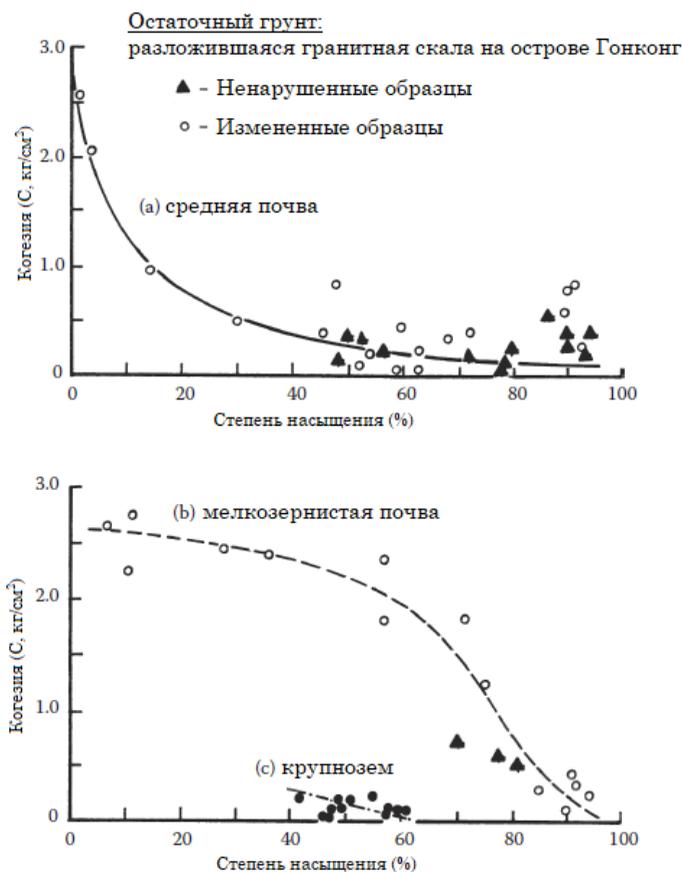


Рисунок 13.2. Степень насыщения и когезия разложившейся гранитной породы: (a) средняя почва, (b) мелкозернистая почва и (c) крупнозем (грубая почва). (По Lumb, P. [1962], Geotechnique, v. 12, no. 3, pp. 226–243.)

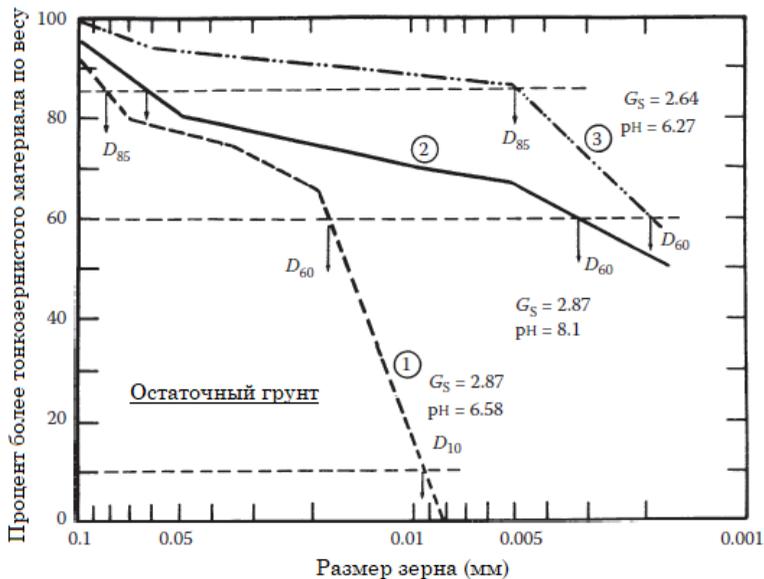


Рисунок 13.3. Влияние поровой жидкости на гранулометрический состав остаточных почв (по Wang [1983], Chinese J. Geotech. Eng., v. 5, no. 1, pp. 147–156. [На китайском с английскими резюме]).

Таблица 13.5. Оценка степени расширения обширных почв по коллоидному содержанию и пределам Аттерберга.

Данные из индексных испытаний			Оценка вероятного расширения, процентного изменения общего объема (от сухого до насыщенного состояния)	Степень набухания
Содержание коллоидов (в процентах минус 0,001 мин)	Индекс пластичности	Предел усадки (в процентах)		
> 28	> 35	< 11	> 30	Очень высокая
20–31	25–41	7–12	20–30	Высокая
13–23	15–28	10–16	10–20	Средняя
< 5	< 18	> 15	< 10	Низкая

Источник: по USBR (1973), Earth Manual, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Co.

13.4.3.2. Идентификация на основе почвенных констант

Идентификация набухающих глин основана на относительных положениях четырех констант почвы, а именно: верхнего предела пластичности (LL), предела пластичности (PL), эквивалента влажности центрифуги (CME) и эквивалента влажности поля (FME) при оценке поведения почвы по отношению к воде. $FME > LL$ указывает на опасность аутогенного разжижения почвы при наличии свободной воды. Если и FME, и CME превышают 30 и если $FME > CME$, почва, вероятно, расширяется после освобождения от нагрузки и классифицируется как обширная почва. Эта процедура обсуждается в разделе 6.3 и обобщается в таблице 6.4.

13.4.3.3. Диэлектрический метод дисперсии

Характеристики диэлектрической проницаемости и диэлектрической дисперсии обсуждались в разделе 9.7. Термин, называемый *индексом набухания грунта* (EI), был предложен Fernando и соавторами (1975), чтобы использовать метод диэлектрической дисперсии для определения экспансивных характеристик почвы. Процедура определения EI основана на одномерном объеме, приведенном Андерсоном и Лейдом (1981). Данный индекс рассчитывается следующим образом:

$$EI = 1000 (\Delta h) (F) \quad (13.1)$$

где EI – индекс расширения; Δh – окончательные показания по шкале минус начальные показания; F – доля пробы, проходящей через сито № 4.

На рисунке 13.4 представлена взаимосвязь между EI и типами почвы, отраженная индексом пластичности (PI). Классификация набухающих почв по величине диэлектрической дисперсии представлена в таблице 13.6. Диэлектрическая дисперсия может быть определена. На основе данных, представленных на рисунке 13.4, было разработано простое уравнение:

$$EI = 2,72 (PI) \quad (13.2)$$

где EI – индекс расширения, а PI – индекс пластичности.

13.4.4. Свойства и проблемы обширных глиняных отложений

Инженерные свойства и поведение набухающих глин в значительной степени зависят от местных факторов окружающей среды. Как обсуждалось в предыдущих разделах, существует как минимум семь факторов, которые могут повлиять на набухание. Рациональный подход к прогнозированию поведения набухающей почвы предложили Nagaraj и Murthy (1985). Феноменологическая модель была сформулирована с теорией усеченного диффузного двойного слоя в качестве научной базы для прогнозирования характеристик набухания. Другие ученые (Mowafy и Bauer, 1985; Ofer и Blight, 1985) обсуждали различные аспекты для прогнозирования давления набухания и факторов, влияющих на поведение набухающей экспансивной глины как в лабораторных условиях, так и в условиях *in situ*. В следующих разделах для иллюстрации их геотехнических проблем, связанных с окружающей средой, используются некоторые различные типы экспансивных глинистых отложений, такие как красные экспансивные глины и черные хлопковые глины.

Рисунок 13.5 показывает усадку и набухание той же красной набухающей глины. Как показано на рисунке 13.5a, скорость объемной усадки увеличивается, а содержание глины, отраженное в верхнем пределе пластичности, также увеличивается. На рисунке 13.5b показано, что скорость объемного расширения увеличивается с увеличением процента содержания влаги, уменьшенного по сравнению с естественным состоянием. Аналогичная тенденция показана для давления набухания, см. рисунок 13.5c.

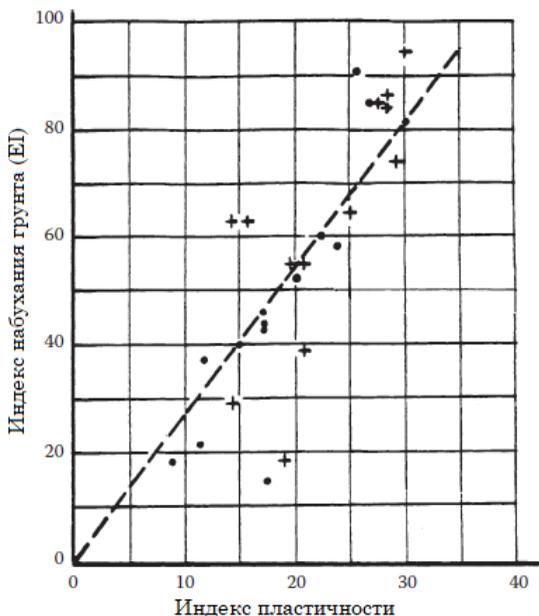


Рисунок 13.4. Взаимосвязь между индексом набухания грунта (EI) и индексом пластичности (IP) (Fernando, J. et al. [1975], J. Geotech. Eng. Div. Proc. ASCE, v. 101, n. GT9, pp. 1003–1013; Anderson, J. N. and Lade, P. V. [1981], ASTM Geotech. Testing J., v. 4, n. 2, pp. 58–67.)

Таблица 13.6. Классификация набухающих почв по величине диэлектрической дисперсии.

Величина диэлектрической дисперсии	Индекс набухания грунта	Потенциальное набухание
1–10	1–20	Очень маленькое
11–25	21–50	Маленькое
26–45	51–90	Среднее
46–65	91–130	Большое
Выше 66	Выше 130	Очень большое

Источник: по Fernando, J., Smith, R., and Arulanandan, K. (1975), J. Geotech. Eng. Div. Proc. ASCE, v. 101, n. GT9, pp. 1003–1013.

Набухающие глины, лежащие над уровнем грунтовых вод, обычно находятся в ненасыщенном состоянии и подвергаются усадке при высыхании, теряя влагу, и набухают при смачивании, впитывая воду. Когда свободное набухание этих почв сдерживается наличием на земле сооружения, они оказывают так называемое давление набухания на конструкцию, создавая следующий парадокс: почва оказывает давление на конструкцию вместо того, чтобы последняя воздействовала на почву. Если конструкция не имеет возможности противостоять этому движению, она в конечном итоге разрушится. Таким образом, при выборе наиболее подходящего фундамента степень набухания почвы должна быть связана с типом надстройки и системой фундамента. Различные компоненты и их связи, которые принимаются во внимание в процессе принятия решений о

проектировании и строительстве в зоне набухающих глин, были разработаны Ramana (1996).

Анализ фундамента и проектирование строительных конструкций на обширных почвах, как правило, обсуждаются многими исследователями. Такие методы включают использование опор для предотвращения подъема легковесных конструкций, основанных на обширных почвах. Исследование *in situ* несущей способности забивных свай в обширной почве дано с учетом конструктивных соображений во всестороннем обзоре Chen (1979) и Gromko (1974) и обобщено в таблице 13.7. Недавние разработки, касающиеся различных аспектов набухающей глины, обсуждают Nelson и Miller (1992).



Рисунок 13.5. Характер усадки и расширения красных набухающих глин из юго-западного региона Китая: (а) степень объемной усадки по сравнению с верхним пределом пластичности, (б) степень объемного расширения относительно процента содержания влаги, уменьшенного по сравнению с его естественным состоянием, (с) давление набухания в зависимости от процента содержания влаги, уменьшенного процента в

Таблица 13.7. Строительные процедуры на набухающих почвах.

Общий прогнозируемый подъем (в дюймах)		Рекомендуемая конструкция (3)	Метод (4)	Замечания (5)
$L/H^a = 11/4$ (1)	$L/H = 2\frac{1}{2}$ (2)			
$0-\frac{1}{4}$	$0-\frac{1}{2}$	Нет мер предосторожности	Фундамент: подушка, ленточный фундамент, опорная плита	Опоры должны быть небольшими и глубокими, соответствовать почвенной способности; опорная плита должна сопротивляться изгибу
$\frac{1}{4}-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}-2$	Жесткие рамки движения при строительстве (стальная арматура по необходимости)	Плиты пола, прямоугольная сборная опалубка ребристого монолитного перекрытия, пустотелый кирпич, стены	Плиты должны быть спроектированы так, чтобы противостоять изгибу, и должны быть независимы от балок. Стены на опорной плите должны быть такими же гибкими, как и фундамент; нет жестких соединений в вертикальном положении; кирпичная кладка должна быть укреплена с помощью стяжек или лент.
$\frac{1}{2}-2$	2-4	Демпфирующее движение здания	Швы в кладке, хорошие и гибкие	Следует избегать контактов между конструктивными элементами, в места соединения может быть вставлен гибкий, водонепроницаемый материал.
			Стены: блочная структура, стальная рама	Стены или прямоугольные строительные элементы должны подниматься как единое целое
			Фундамент: секционированный, домкраты	Секционный фундамент допускает небольшое расширение почвы, чтобы уменьшить давление набухания; регулируемые домкраты могут быть неудобны для владельца; трехточечная нагрузка позволяет движение без принуждения
>2	>4	Здание, независимое от движения	Фундаментные опоры Прямой вал	Следует размещать наименьший диаметр и широко расположенные опоры, совместимые с нагрузкой; должен быть устранен зазор под балками
			Подвесные полы	Полы должны быть подвешены на балках от 12 до 18 дюймов над землей.

^a L/H – отношение длины к высоте стеновой панели.

Источник: по Gromko, G. J. (1974), J. Geotech. Eng. Proc. ASCE, v. 100, n. GT6, pp. 667–687.

13.4.5. Черные хлопковые почвы

Большая часть центральной и южной Индии, Бирмы и Кении покрыта черными хлопковыми почвами (Wooltorton, 1954), это одна из основных набухающих почв. Черная хлопковая почва имеет черный цвет, проявляет чрезмерное набухание и усадку, а также обладает высокими характеристиками пластичности. Из-за чередующихся условий для смачивания и высыхания на поверхности земли наблюдаются глубокие и широкие трещины. Такие почвы в местном масштабе называют черными хлопковыми почвами, они рассматриваются как очень проблематичные для строительства домов и дорог. Текстура почва классифицируется как глина. Ее характерными особенностями являются высокий верхний предел пластичности, предел пластичности и очень низкий предел усадки. Это означает, что глинистые минералы, присутствующие в почве, могут быть монтмориллонитом или смесью монтмориллонита и иллита.

Улучшение почвы этого типа было изучено Katti и Barve (1962), которые пришли к выводу, что после добавления KOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и NaOH , почва превращается из пластичной глины в рыхлую почву с увеличением SL , когда количество химических добавок превышает 1,5 %. NaOH оказывает выраженное влияние на увеличение SL . При более низких процентах NaOH фактически увеличивает PI . $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и KOH ниже 1 % увеличивают PI . В целом, CaCl_2 , MgCl_2 и BaCl_2 , а также более низкий уровень LL увеличивают PI , но мало влияют на SL . KCl , превышающий 2 %, фактически снижает PI почвы и отчетливо увеличивает SL . Na_2CO_3 , BaCO_3 , MgCO_3 и Na_2SiO_3 увеличивают PI почвы, делая почву очень пластичной. FeCl_3 и $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ делают почву пористой.

13.5. ОРГАНИЧЕСКИЕ ПОЧВЫ

13.5.1. Характеристика органических почв

Органические почвы – это те почвы, твердые составляющие которых состоят преимущественно из растительного вещества на разных стадиях разложения или консервации. Они обозначены как мускусные и болотные почвы с разграничением между торфяными и навозными почвами, с одной стороны, и прибрежными болотистыми почвами, с другой. Muck указывает на более высокую степень разложения растительного вещества и смешивания с минеральными составляющими почвы в отличие от чисто растительного торфа, в котором хорошо сохранились остатки растений. В зависимости от источника водоснабжения можно выделить несколько типов торфяников, в частности в высоких болотах, куда вода в основном поступает из осадков, и в низких болотах с дренажом с прилегающих территорий.

Органические почвы являются внутризональными гидроморфными почвами. Это означает, что они могут встречаться в любой макроклиматической зоне, если гидрологические и топографические условия создают бассейны стоячей воды или участки суши с повышающимся уровнем грунтовых вод. Из-за влияния экологических факторов и факторов экологии растений эти почвы лучше всего рассматривать как органическую жидкую торфяную почву и классифицировать в соответствии с генетическими принципами, как это было сделано торфяным

подкомитетом Национального совета исследований Канады (MacFarlane и Williams, 1974).

Материнским материалом органических почв является местная растительность, которая может охватывать широкий спектр водных, болотных и лесных растений. У любой лесной растительности или другой растительности над поверхностью земли или воды есть аналог, своего рода искаженное зеркальное отображение под этой поверхностью. Этот аналог образован корневыми системами, которые функционально и геометрически связаны с нормально видимой частью. Фактически, подземная или подводная часть может вносить больший вклад в образование торфа и гумуса, чем более быстро разлагающееся органическое вещество, находящееся над поверхностью. Тем не менее функциональные и геометрические отношения между видимой и невидимой частями растительности доказывают важность поверхностного покрова для целей классификации жидкой торфяной почвы.

13.5.2. Классификация органических почв

Поскольку исходным материалом органических почв является естественная растительность, которая может охватывать широкий спектр водных и болотных лесных растений, необходимо изучить инженерную классификацию этих типов почв на предмет свойств самой органической почвы, включая как видимые, так и невидимые части растительных систем. Предлагается несколько систем классификации, в том числе классификации Торфяного подкомитета Национального совета по исследованиям Канады (MacFarlane, 1969), ASTM (ASTM D2607-69), Arman (1970) и Landva (1983). Краткое обсуждение каждой системы классификации представлено ниже.

13.5.2.1. Классификация NRC (1969)

Классификация Национального исследовательского совета (NRC) Канады основана на характеристиках подземного материала и свойствах органической почвы, являющейся продуктом взаимодействия рельефа, растительности, толщ воды, процессов разложения и консервации, как показано в таблице 13.8. Семнадцать типов органических почв признаются в зависимости от степени присутствия следующих типов структурных компонентов:

- 1) аморфных и зернистых;
- 2) недревесных и мелко-древесных волокнистых;
- 3) частиц древесины и грубых древесных волокон.

13.5.2.2. Классификация ASTM (1972)

ASTM представил систему классификации для торфа, мхов, гумуса и связанных с ними продуктов (ASTM D2607-72). Термин «торф», согласно ASTM, относится только к органическому веществу геологического происхождения, исключая уголь, образовавшийся из мертвых растительных остатков в воде и в отсутствие воздуха. Процесс образования торфа происходит в болоте, топи или трясины; торф имеет содержание золы, не превышающее 25 % по сухому весу. Классификация основана на пяти основных типах в зависимости от генетического происхождения содержания клетчатки. Процентное содержание клетчатки

основано на высушенной в печи массе при 105°C, а не на объеме. Далее перечислены пять основных типов.

1. *Торф сфагнового мха* (торфяной мох): высушенный в печи торф должен содержать не менее 66 % волокна сфагнового мха по весу.

2. *Торф гипсового мха*: этот торф должен содержать не менее 33,3 % по массе, из которых волокна гипнового мха должны составлять более 50 %.

3. *Торфяно-осоковый торф*: высушенный в печи торф должен содержать не менее 33,3 % клетчатки по массе, из которых камышово-осоковые и другие немассовые волокна должны составлять более 50 %.

4. *Торфяной гумус*: высушенный в печи торф должен содержать менее 33,3 % по весу.

5. *Другой торф*: все виды торфа, не классифицированные здесь.

Другая информация, касающаяся торфа, включает процедуры отбора проб (ASTM D2944), методы измерения влажности и содержания золы (ASTM D2974), измерения объема (ASTM D2978) и водоудерживающую способность (ASTM D2980); другие данные доступны из стандартов ASTM.

Таблица 13.8. NRC-классификация структур торфа.

Преобладающая характеристика	Категория	Название
Аморфный-зернистый	1	Аморфно-гранулированный торф
	2	Недревесный мелкозернистый торф
	3	Аморфно-гранулированный торф, содержащий недревесные тонкие волокна
	4	Аморфно-гранулированный торф, содержащий древесные мелкие волокна
	5	Торф, преимущественно аморфно-гранулированный, содержащий недревесные тонкие волокна, удерживаемый в древесных тонковолокнистых рамках
	6	Торф, преимущественно аморфно-гранулированный, содержащий тонкие древесные волокна, удерживаемый в древесной грубоволокнистой структуре
	7	Альтернативное наложение недревесного торфа с мелкими волокнами и аморфно-зернистый торф, содержащий недревесные тонкие волокна
Мелковолокнистый	8	Недревесный мелкозернистый торф, содержащий массу грубых волокон
	9	Древесный, мелко-волокнистый торф, удерживаемый в древесно-грубоволокнистой основе
	10	Древесные частицы, содержащиеся в недревесном мелкозернистом торфе
	11	Древесные и недревесные частицы, содержащиеся в мелкозернистом торфе
Грубый волокнистый	12	Древесный, грубоволокнистый торф
	13	Грубые волокна пересеченного мелкозернистого торфа
	14	Недревесный и древесно-мелкий волокнистый торф в грубоволокнистой структуре
	15	Древесная сетка из волокон и частиц, содержащих аморфно-гранулированный торф, включающий мелкие волокна
	16	Древесный, грубоволокнистый торф с разбросанными древесными кусками
	17	Сетка из плотно прилегающих бревен и корней, окружающих древесный грубоволокнистый торф с древесными кусками

Источник: по MacFarlane (1969), Muskeg, Engineering Handbook, Univ. of Toronto Press, Toronto, Canada.

13.5.2.3. Классификационная система штата Луизиана (1970)

Для практических применений Agman (1970) из Университета штата Луизиана предложил инженерную систему классификации органических почв, как показано в таблице 13.9. Ученый классифицирует органические почвы как органическую и песчаную глину, ил или глину. Далее он разбивает основные категории на группы в зависимости от количества органического содержимого. Диапазоны физических характеристик основаны на лабораторных исследованиях. Для каждой группы дано значение конкретной почвы для ее использования в качестве материала для насыпи на шоссе или для общих фундаментных работ.

Существует множество других систем классификации органических почв; некоторые из наиболее распространенных систем классификации для сравнения представлены в таблице 13.10.

Таблица 13.9. Классификационная система штата Луизиана

Основные группы	Символ группы	Органическое содержание (%)	Диапазон рН	Удельный вес	Характеристики дренажа	Верх. предел пластин. (%)	Индекс пласт. (%)	Ценность как базового материала	Ценность как материала для насыпи	Другое использование
Песчаная глина и органический материал	SWO-1E	0-15	>7,0	>2,40	От: сильной прониц. до: удовлетворит.	26-37	7-8	От: отл. до: удовлетв.	Отличная	Фундамент для дамб, земляных плотин и сооружений
	SWO-2F	15-20	6,0-7,0	2,18-2,40	Плохая	37-48	3-8	От: удовл. до: низкой	От удовл. до: низкой	Фундамент для набережных, дамб и легких конструкций
	OS-1F	21-30	6,0-7,0	2,18-2,40	Плохая	37-48	3-8	От: удовл. до: низкой	От: удовл. до: низкой	Фундамент для набережных, дамб и легких конструкций
Ил и органический мате-риал	OS-2	31-50	5,5-6,0	1,83-2,18	Плохая	48-72	0,8-3	Нет	Никакая	Ограниченное использование в качестве основания насыпи после уплотнения
	OS-3	>50	<5,5	<1,83	Плохая	>72	Нет	Нет	Нет	Нет
	SWO-1G	0-15	>7,0	>2,45	От: плохой непроч. до: плохой прониц.	32-41	12-13	От: хор. до: удовл.	От: отл. до: удовлетв.	Фундамент для дамб, земляных плотин и сооружений
Глина и органический материал	SWO-2F	15-20	6,0-7,0	2,10-2,45	От: очень плохой до: плохой	41-56	13-20	Удовл.	Удовл.	Фундамент для набережных, дамб и легких конструкций
	OS-1F	21-30	6,0-7,0	2,10-2,45	От: очень плохой до: плохой	41-56	13-20	Удовл.	Удовл.	Фундамент для набережных, дамб и легких конструкций
	OS-2F	31-50	5,5-6,0	1,75-2,10	Плохая	56-72	17-20	От: удовл. до: низкой	Никакая	Ограниченное использование в качестве основания насыпи и дамбы
	OS-3	>50	<5,5	<1,75	Плохая	>72	Нет	Нет	Нет	Нет
	SWO-1	0-15	>7,0	>2,37	От: удовл. до: плохой	65-67	26-40	Нет	Удовл.	Дамбы, земляные плотины и сооружения
	SWO-2	15-20	6,0-7,0	2,15-2,37	От: очень плохой до: плохой	65-66	18-26	Нет	От: удовл. до: низкой	Дамбы и земляные плотины
	OS-1	21-30	6,0-7,0	2,15-2,37	От: очень плохой до: плохой	65-66	18-26	Нет	Нет	Основание насыпи после уплотнения
	OS-2	31-50	5,5-6,0	1,81-2,15	Плохая	66-76	12-18	Нет	Нет	Основание насыпи после уплотнения
	OS-3	>50	<5,6	<81	Плохая	>76	Нет	Нет	Нет	Нет

13.5.3. Технические свойства органических почв

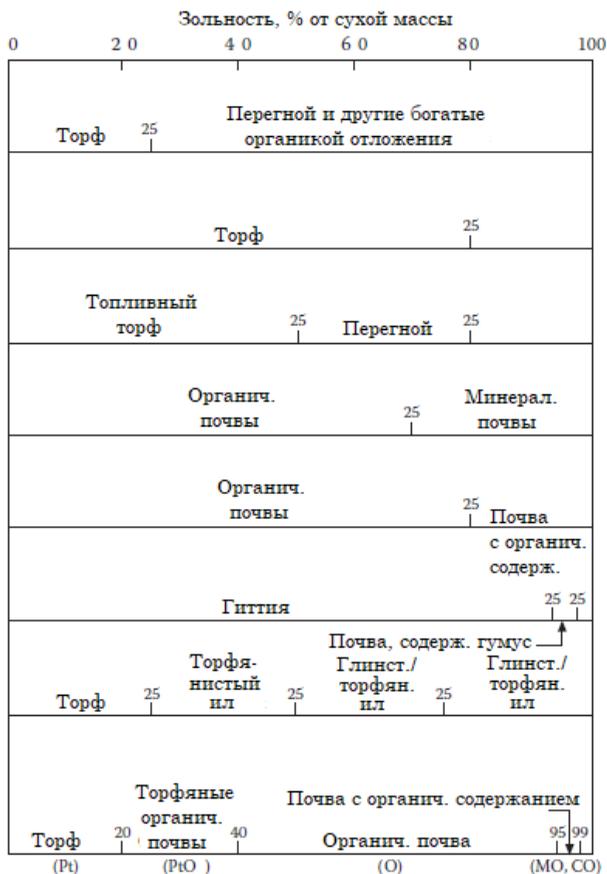
13.5.3.1. Содержание воды и почвенные константы

Инженерные свойства органических почв должны быть определены *in situ*, на месте и в лаборатории, в состоянии настолько близком к обычному или разрушенному, как может потребовать соответствующее инженерное использование. Инженерные свойства органических почв, обсуждаемые в этом разделе, относятся к (1) торфу и торфяной почве, (2) органической почве вулканического пепла и (3) гумусу. Удельный вес торфа колеблется от 1,1 до 2,5, при этом значения выше 2,0 указывают на заметный вклад минерального вещества, который может быть проверен путем определения содержания золы. Низкий удельный вес как органического вещества, так и воды приводит к снижению удельного веса природного торфа. В целом, удельный вес и влагопоглощение почв связаны с их органическим содержанием; поглощение влаги увеличивается, а удельный вес уменьшается с увеличением содержания органики.

Органическая почва может содержать большое количество воды, как показано на рисунках 13.6 и 13.7. Рисунок 13.6 показывает, что для почвы, содержащей 80 % органических веществ, ее содержание воды может превышать 1600 %. На рисунке 13.7 сухая плотность (то есть единичный вес) и максимальная водоудерживающая способность сравниваются для торфяной почвы, морской глины и дерева (Ohira, 1977). На обоих рисунках видно, что органическая почва может удерживать до 1500 % воды. Водная фаза большинства органических почв является кислотной, значения pH варьируются от 4 до 7, но встречаются значения от 2 до 8.

13.5.3.2. Проницаемость, сжимаемость и другие свойства

Таблица 13.10. Сравнения систем классификации органических почв



Источник: по Landva, A. O. et al. (1983), Geotechnical classification of peats and organic soils, ASTM STP 820, pp. 37–51.

Органические почвы очень сжимаемы; большая часть сжатия происходит в очень короткий период времени. Характеристики консолидации органических почв, содержащих менее 20 % органического материала, вписываются в теорию консолидации Терцаги (Arman, 1970). Когда органические почвы высушиваются, они не уже поглощают такое же количество воды, которое они изначально содержали, и это является причиной того, что органическая почва не может получить надлежащее уплотнение.

Связь между K_0 , коэффициентом давления грунта в состоянии покоя и коэффициентом переуплотнения OCR для органических почв отмечается Edil и Dhowian (1981) и указывает на то, что во всех случаях OCR увеличивается при увеличении K_0 . Другие инженерные и коррозионные свойства органических почв, а также процедуры проектирования и строительства подробно обсуждаются Исследовательским комитетом по органическим почвам, Японским обществом механики грунтов и фундаментостроения (Yamanouchi, 1977).

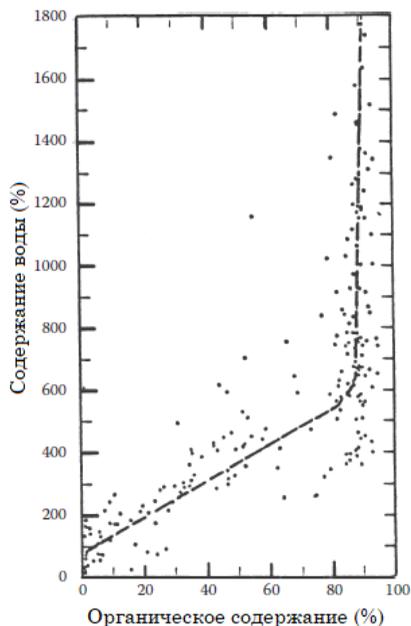


Рисунок 13.6. Содержание органических веществ в сравнении с содержанием воды (по MacFarlane, I. C. and Rutka, A. [1962], HRB Bullertin 316, pp. 32–43. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не подлежит защита авторских прав).

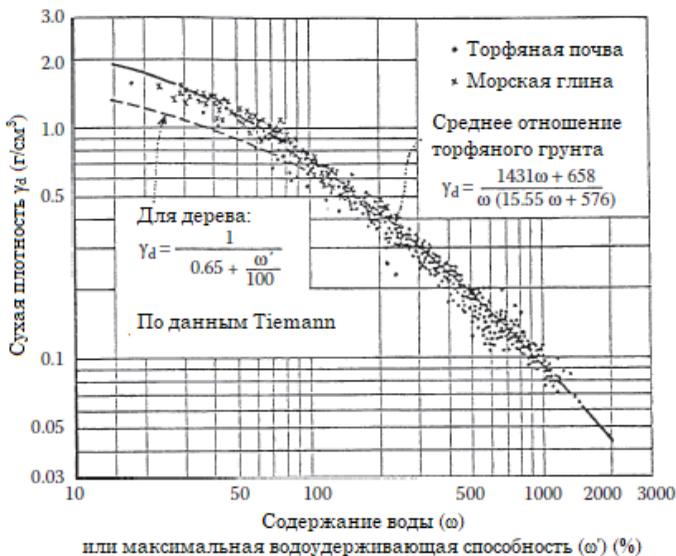


Рисунок 13.7. Связь между сухой плотностью и содержанием воды для торфяных почв, морской глины и древесины (по Ohira, Y. [1977], Engineering Problems of Organic Soils in Japan, Japanese Society of SMFE, pp. 19–34.)

13.6. КАРСТОВАЯ ОБЛАСТЬ (КАРСТОВАЯ ВОРОНКА)

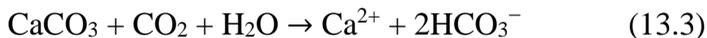
13.6.1. Общее обсуждение

Внезапное появление провалов уже давно преследует человечество в определенных геологических районах, особенно в последнее время, поскольку до сих пор сельские земли все чаще используются для жилищного и промышленного развития. Эта главная особенность ландшафта карстового региона формируется в результате удаления кальция и магния в виде бикарбонатов из отложений породы, имеющей состав от чистого известняка до доломитовых известняков и доломита, двойной соли карбоната кальция и магния $(Ca, Mg)(CO_3)_2$. Удаление происходит с помощью воды с растворенным в ней CO_2 . Решения этой проблемы разрабатываются здесь настолько широко и по-разному, что становятся геологическими моделями, а термин «карстовая топография» применяется к любой местности, на которой встречаются названные особенности. Хотя ни один другой регион не соответствует такой области, некоторые похожие формы раствора появляются там, где толстый, плотный известняк широко открыт и хорошо дренирован. Эти проявления также наблюдаются там, где другие растворимые минералы, в частности каменная соль и гипс, образуют коренные породы на поверхности или вблизи нее, однако термин «карст» относится к геологическим последствиям растворов как чистых бикарбонатов или смешанных карбонатов щелочноземельных металлов, особенно Ca и Mg.

13.6.2. Процессы и механизмы решения

Известняки состоят в основном из карбоната кальция ($CaCO_3$), обычно в форме минерального кальцита. Кальцит относительно нерастворим в чистой воде, но его растворимость быстро увеличивается с увеличением кислотности воды. В поверхностных средах наиболее распространенным источником кислотности является углекислота, полученная из растворенного углекислого газа (CO_2). Кислотность подземных вод также влияет на минеральные осадки в пещерах. Существуют четыре основных химических реакции раствора известняка, выраженные следующим образом.

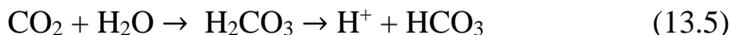
1. Реакция карбоната кальция ($CaCO_3$) в растворе диоксида углерода (CO_2)



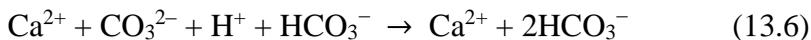
2. Реакция карбоната кальция в $CaCO_3$



3. Реакция карбоната кальция в CO_2



4. Тогда уравнение 13.3 можно переписать следующим образом:



Упрощение уравнения 13.6 выглядит так:



Дальнейшее обсуждение реакции растворения с диоксидом углерода представлено в работе White и соавторов (1995). Основы процессов для решения проблемы могут быть проиллюстрированы химией раствора известняка. Эта порода состоит из кальцита (CaCO_3), процентное содержание которого может варьироваться. Выраженная в граммах на литр чистой воды, его растворимость показана на рисунке 13.8. Уже очень маленького содержания CO_2 в окружающей среде достаточно, чтобы утроить растворимость при 25°C , когда вода азрируется. Насыщение CO_2 при атмосферном давлении увеличивает растворимость кальцита до 0,9 г/л воды, что примерно в 64 раза выше, чем в чистой воде. Проточная и просачивающаяся вода уносит растворенное вещество по мере его образования. Углекислый газ поглощается водой из атмосферы и из почвенного воздуха, где он концентрируется из-за распада органического вещества или загрязненной воды, которая может также давать компоненты из растворов, которые повышают растворимость кальцита по сравнению с тем, что обусловлено содержанием CO_2 в воде. В некоторых районах карбонатная эрозия протекает относительно быстро. Например, в штате Кентукки скорость удаления известняка была такой: 1 фут толщины за 2000 лет. По мере удаления карбоната остаются плохо растворимые примеси, такие как кремнезем, оксид алюминия, оксиды железа и другие, причем соединения трехвалентного железа отвечают за типичные красный и желтый цвета остаточных почв. Поскольку основным условием для раствора известняка является обильное количество осадков для стимулирования продуцирования растений и углекислого газа и для обеспечения водой растворителя, засушливые районы не способствуют образованию карста. При большом количестве воды развитию карста способствуют хорошо соединенные пласты, которые позволяют воде легко проходить.

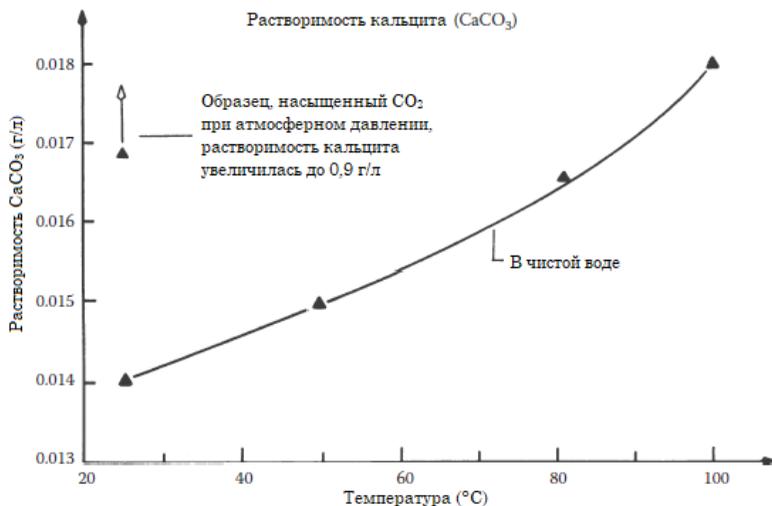


Рисунок 13.8. Влияние температуры на растворимость CaCO_3 .

13.6.3. Карстовая воронка и ее взаимодействие с окружающей средой

Карстовая воронка является наиболее распространенным образованием среди карстовых объектов и может встречаться в таком большом количестве, что сельская местность будет выглядеть сильно избитой. Центральная Флорида – один известный пример; другая важная область – южная Индиана, где общее количество провалов оценивается в 300000 штук. Также сообщается о большом количестве провалов в Пенсильвании и Иллинойсе. На рисунке 13.9 дана фотография ранней стадии провала в известняковом регионе в Рединге, штат Пенсильвания.

В известняковой местности часто можно наблюдать временные поверхностные потоки, тогда как только объемистые реки могут поддерживать длительный курс над землей на известняковой местности. На хорошо дренированном известняке большинство каналов поверхностного потока вскоре приводят к созданию водопоглощающих воронок, которые соединяются со сложными системами подземных каналов.

Области эрозии в известняке определяются поясами стойкой к растворению породы. Известняковые толщи часто переходят в сланцы и наоборот. Так как слои сланца обычно плохо соединены, а его частицы малы и хорошо уплотнены, он имеет тенденцию блокировать циркуляцию. Следовательно, перколирующая вода распространяется вниз по сланцевому пласту или стекает в провал, пока не достигнет мест, через которые может быть возобновлено движение вниз. Накопление нерастворимых примесей, оставшихся от раствора известняка, также блокирует циркуляцию, заполняя стыки, что еще больше усложняет формирование воронкообразного провала.



Рисунок 13.9. Фотография, показывающая раннюю стадию провала в известняковом регионе в Рединге, штат Пенсильвания.

Непроницаемые или нерастворимые слои иногда оставляются исчезающими потоками. Такие потоки текут по устойчивому слою, пока они не найдут воронку просасывания, затем они следуют по каналам вдоль устойчивого слоя на более низком уровне. Иногда этот более низкий уровень может привести к поверхности,

где течение потока вновь проявится на расстоянии всего нескольких миль. Исследование вероятности появления провалов в долине Лихай на востоке Пенсильвании было проведено Lilly (1976). Perlow и соавторы (1983) сообщили, что загрязненная вода влияет на рост провалов в долине Лихай в восточной части Пенсильвании. Полевые исследования, основанные на буровых журналах, описывающих области известняка, говорят о пустотах в слоях, указывающих на потенциальные воронки в известняке.

13.6.4. Действия, направленные на устранение карстовых воронок

Все предполагаемые участки с воронками должны быть исследованы на наличие месторождений, а керны должны быть пробурены на глубину, соответствующую масштабу предлагаемой конструкции. Если воронки обнаружены, их следует избегать, если это возможно, поскольку коррекция часто бывает трудной, дорогостоящей и неопределенной. Процедуры коррекции включают в себя следующие меры.

1. Если нельзя избежать провала, он должен быть заполнен подходящим материалом или соединен мостом, при этом будет создана прочная основа. Сначала полость очищается до тех пор, пока твердые известняковые породы, образующие ее стенки, не будут обнажены. Затем воду заливают в полость, предпочтительно под давлением, чтобы определить, произойдет ли какой-нибудь прорыв вниз – в нижележащие каналы или пещеры.

2. Если полость относится к типу воронки или открывается в пещеру, может быть целесообразно построить бетонную платформу через отверстие и заполнить ее сверху. Края воронки вырыты на прочном фундаменте, а через отверстие установлена железобетонная плита. Все соединения плиты с воронкой полностью герметичны, чтобы предотвратить попадание воды.

3. Независимо от корректирующих методов, поверхностный дренаж должен быть направлен в сторону от площадки, и следует соблюдать крайнюю осторожность, чтобы полностью герметизировать воронку и тем самым предотвратить ее повторное возникновение.

4. Другие профилактические и корректирующие меры включают изменение фундамента, глубоких фундаментов и цементации.

13.7. ЛЕССЫ (ЭОЛИАНСКИЕ ОТЛОЖЕНИЯ)

13.7.1. Происхождение и распространение

Лесс – это оловое отложение, частицы которого преимущественно имеют размер ила, но с определенным количеством мелкого песка и глинистых частиц. Долинные потери обычно развиваются в районах, периферийных к тем, которые покрыты последними ледяными щитами. Другие важные лессовые месторождения находятся в Аргентине и Китае. Типичный лесс имеет содержание карбоната кальция, действующего как связующий агент, который, хотя и слабый, но позволяет лессу образовывать вертикальные или даже нависающие стенки на берегах потоков. Склоны под углами менее 90° легко размываются. Данные о

распределении лесса и о прочих геологических аспектах в США даны в работе Turnbull (1968).

Китай хорошо известен как крупнейший в мире лессовый регион, содержащий породу с большой толщиной и полной последовательностью слоев. С 1949 года были проведены обширные исследования взаимосвязи между геологической средой и инженерными свойствами лессовой почвы в Китае (CAS, 1961). Лесс в Китае расположен к югу от Монгольского плато. Поскольку холодный поток воздуха из полярной области распространяется на юг, он переносит пыль из пустыни в верхние слои воздуха, вызывая пыльные бури. Это часто происходит в Китае в весенние и зимние сезоны. Данные о распределении лесса и о прочих геологических аспектах в Китае приведены в работе Gao (1983).

13.7.2. Явление разрушаемости и его механизмы

Существуют различные гипотезы и теории относительно разрушаемости лессовых почв, например, (1) капиллярный эффект, (2) растворение соли, (3) ионный обмен и (4) дефицит глинистых коллоидов и заклинивающий эффект водной пленки, а также недостаточное сжатие. Эти возможные механизмы разрушения были объяснены с механической, физической, физико-химической и геологической точек зрения. Разрушение лесса происходит в основном при смачивании под давлением, и обычно разрушаемость ограничивается верхними 1–15 м. В зависимости от давления покрывающих пород лессовый слой можно разделить на два класса: (1) лесс, оседающий под действием собственного веса, и (2) лесс, оседающий не под действием собственного веса. Некоторые из этих механизмов и явлений кратко представлены далее.

1. *Коэффициент сжимаемости (d_s)*: индексом для определения сжимаемости лесса является отношение осадения образца при смачивании при определенном внешнем давлении (обычно используемом как 0,2 МПа) к начальной толщине образца. Когда $d_s > 0,015$, лесс определяется как оседающий.

2. *Коэффициент разрушаемости под действием собственного веса (d_{zs})*: данный коэффициент – это отношение осадения образца почвы при смачивании под его собственным весом к начальной толщине образца. Если $d_{zs} > 0,015$, лесс определяется как оседающий под действием собственного веса.

3. *Чувствительность к разрушению*: чувствительность к разрушению относится к скорости оседания лесса после смачивания. Подверженный разрушению лесс оседает на быстрой скорости и может повредить конструкции.

4. *Исследование микроструктуры*. Чтобы получить представление о явлении оседания, нужно изучить причины складываемости лесса с точки зрения глинистой ткани (Gao, 1983), используя сканирующий электронный микроскоп, который поможет установить несколько важных фактов.

а. Микроструктура лесса показывает, что разнесенная зернистая структура в лессе является основной причиной оседания.

б. Региональное изменение микроструктуры согласуется с тенденцией оседания, постепенно уменьшающейся из-за направления воздушного потока.

с. На основании выводов Gao о формировании лесса можно сформировать четыре стадии: (1) стадия лессизации, (2) стадия формирования, (3) стадия

развития и (4) стадия глинирования. Четыре этапа лесса регулярно наблюдаются в разных регионах плато Лесс и, как отмечается, зависят от климатических и экологических условий.

13.7.3. Свойства и основные проблемы

Состав и свойства лессов тесно связаны с географической и геологической средой. В США есть три основных типа лессовых зон. Типичные градационные кривые для каждой зоны представлены на рисунке 13.10. Диапазон значений физико-механических свойств включает пределы Аттерберга. Данные об испытаниях на уплотнение и прочность приведены в таблице 13.11. Физико-химические свойства лесса, включая ионообменную емкость, процентное содержание глины и pH раствора, обсуждались в разделе 4.8 и показаны на рисунке 4.11. Коэффициент проницаемости лесса в естественном состоянии показан на рисунке 13.11. При рассмотрении рисунка 13.11a показано, что на проницаемость влияет исходное содержание влаги в условиях *in situ*. На рисунке 13.11b показано, что на проницаемость также влияет поровая жидкость. При том же соотношении пустот керосин дает большую проницаемость, чем вода. Связь между катионообменной емкостью и содержанием аморфного материала в лессе обсуждается в разделе 4.8.

К принципиальным проблемам в лессовых регионах относятся несущая способность, оседание и эрозия. На рисунке 13.12 представлена допустимая несущая способность лесса в зависимости от отношения верхнего предела пластичности к количеству пустот (LL/e) для различных влагосодержаний в естественных условиях. Для данного влагосодержания с увеличением верхнего предела пластичности к количеству пустот допустимая несущая способность также увеличивается. Проблемы оседания и эрозии в лессовых регионах также важны, и дальнейшие обсуждения представлены в главах 14 и 15.

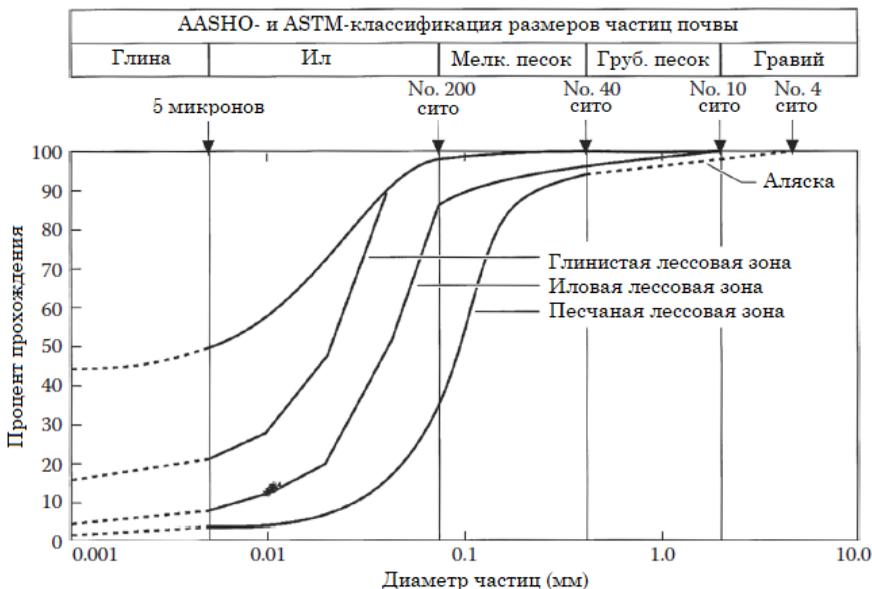


Рисунок 13.10. Градация характеристик лесса в США (по Sheeler, J. B.[1968], Summarization and comparison of engineering properties of loess in the United States, HRR no. 212, pp. 1–9. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в свободном доступе и не подлежит защите авторских прав).

13.8. ДИСПЕРСИВНЫЕ ГЛИНЫ

13.8.1. Общее обсуждение

Некоторые мелкозернистые почвы, называемые «дисперсионными» почвами с более высоким содержанием растворенного порового натрия, чем в обычных почвах, быстро разрушают формирующие туннели и глубокие овраги в результате процесса, в котором отдельные частицы глины превращаются в суспензию в медленной воде (коллоидная эрозия), разрушая земляные дамбы, каналы и другие сооружения. Дисперсионные почвы нельзя отличить от обычных почв обычными геотехническими испытаниями. Эта глина может иметь тот же внешний вид, что и обычные глины. Термин «дисперсионная глина» был введен Г. М. Волком в 1937 году. Первое четкое описание этого явления с геотехнической точки зрения было дано в начале 1960-х годов австралийскими инженерами (Aitchison и соавторы, 1963) после исследования разрушений на многих небольших фермерских плотинах. Исследования, проведенные в 1970–1971 гг. при финансовой поддержке Службы сохранения почв США в связи с авариями на глиняных плотинах в США, полностью подтвердили основные австралийские выводы, представленные Sherard и соавторами (1976).

Рисунок 13.11. Физико-механические свойства лесса в США.

Свойства	Расположение и параметры							
	Айова	Небраска	Теннесси	Миссисипи	Иллинойс	Аляска	Вашиントン	Колорадо
Удельный вес	2,68–2,72	2,57–2,69	2,65–2,70	2,66–2,73		2,67–2,79		
<i>Механический анализ</i>								
Песок, %	0–27	0–41	1–12	0–8	1–4	2–21	2–10	30
Ил, %	56–85	30–71	68–94	75–85	48–54	65–93	60–90	50
Глина, %	12–42	11–49	4–30	0–25	35–49	3–20	8–20	20
<i>Пределы Аттерберга</i>								
LL, %	24–53	24–52	27–39	23–43	39–58	22–32	16–30	37
PL, %	17–29	17–28	23–26	17–29	18–22	19–26		20
PI	3–34	1–24	1–15	2–20	17–37	NP-8	<8	17
<i>Классификация</i>								
Текстуры	SL, SCL, SC	SL, SCL, SC	SL, SCL, SC	SL, SCL	SC, C	SL, SCL		SL
AASHO	A-4 (8) A-7-6 (19)	A-4 A-6	A-4 (8) A-6 (10)	A-4 (8) A-6 (9)	A-6 (11) A-7-6 (20)	A-4 (8)		A-6 (10)
Унифицированные	ML, CL, CH	ML, CL	ML, CL	ML, CL	CL, CH	ML, CL-ML		CL
<i>Данные испытания плотности</i>								
Стандарт. OM, %	15–20		14–16			13–18		
Модифицирован. OM, %	13–18							
Стандарт. MD, pcf	103–112		100–108			103–112		
Модифицирован. MD, pcf	113–119							
MD на месте, pcf	66–99			80–104				76–95
Полевая влажность, %	4–31		12–25	19–38		11–49		8–10
<i>Прочность на сдвиг</i>								
Испытание на неограниченное сжатие				2–8				
Неконсолидированный недренированный трехосный сдвиг, c, psi		0–67		2–10				
Консолидированный недренированный трехосный сдвиг, c, psi	0–8			3–8				
Консолидированный дренированный прямой сдвиг	0.3–1.8			0				
CBR				10–13				

Источник: данные из Davidson, D. T. and Sheeler, J. B. (1952), Proc. Highway Res. Board, v. 31, pp. 558–563; и другие.

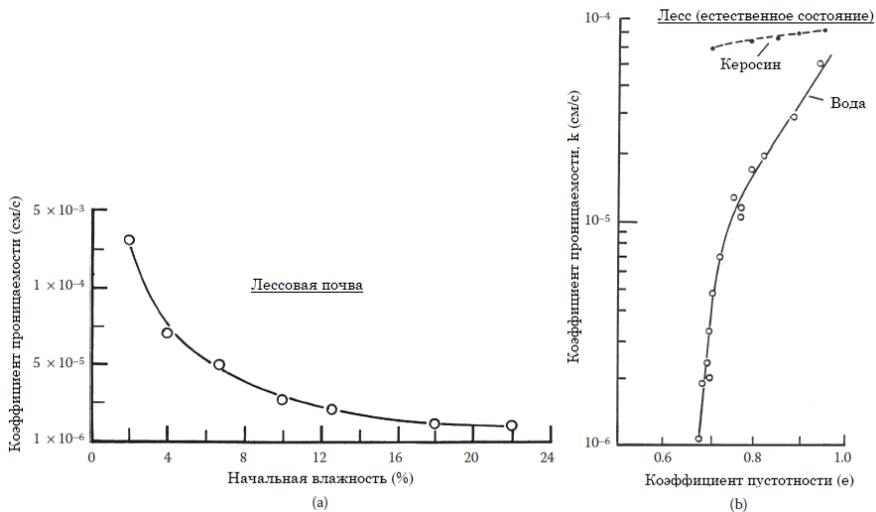


Рисунок 13.11. Коэффициент проницаемости лесса: (а) влияние на начальное содержание влаги и (б) влияние на поровую жидкость (по CAS [1961], Research on loess, Civil Engineering Research Report no. 13, Chinese Academy of Science, Beijing, 157 p.).

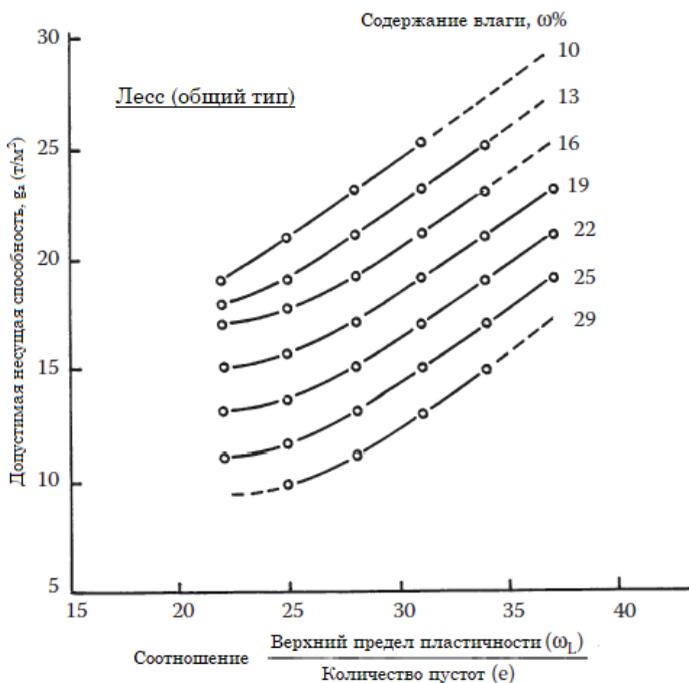


Рисунок 13.12. Допустимая несущая способность в зависимости от отношения верхнего предела пластичности к пористости лессового осадка (данные из МСРС 2004; код для строительства в складных лессовых регионах).

3.8.2. Процедуры идентификации

Доступны три метода определения того, является ли почва дисперсионной или недиспергирующей: (1) двойной гидрометрический тест, (2) тест на растворимую соль в поровой воде и (3) тест на наличие малых отверстий. Среди этих испытаний тест на наличие малых отверстий представляет собой самый простой метод, в котором используется дистиллированная вода, протекающая через отверстие диаметром 1,0 мм в уплотненном образце. Типичная испытательная установка устройства для эрозии отверстий на водном пути экспериментальной станции (WES) показана на рисунке 13.13а, а представление результатов лабораторных испытаний между диспергирующим и недиспергирующим грунтом показано на рисунке 13.13 (b и c). Как показано на рисунке 13.13b, для диспергирующих глин вода становится окрашенной, и образец несет мутно окрашенную суспензию коллоидов, поскольку отверстие быстро разрушается. Для недисперсионной глины вода кристально чистая, а эрозии нет.

13.8.3. Свойства и основные проблемы

Инженерные свойства дисперсионной глины определяются в основном содержанием воды и растворимых солей в системе почва–вода. На рисунке 13.14 показан процент содержания натрия в сравнении с растворимыми солями. На том же рисунке указывается, что более высокое содержание натрия более важно для почвы, обладающей дисперсионным поведением. На рисунке 13.15а показано влияние поровой жидкости, отраженное рН, на гранулометрический состав. Рисунок 13.15b показывает зависимость D_{15} от рН, и получены большие вариации, особенно для низких значений рН. Дисперсионные глины, относящиеся к прогрессирующей эрозии и оползням, будут дополнительно обсуждаться в разделах 14.5 и 16.7.

13.9. ЛАТЕРИТНЫЕ ПОЧВЫ

13.9.1. Характеристика латеритной почвы

Латеритные почвы являются экстремальными типами ластозолей, которые формируют подотряд зональных (климатических) почв и включают почвы, образованные в лесных тропических и влажных условиях. Их глинистые фракции имеют низкое соотношение кремнезема и полуторной окиси и низкую активность и способность к обмену основаниями. Латериты имеют низкое содержание растворимых компонентов большинства первичных минералов. Их вторичные агрегаты обычно очень стабильны и водостойки, а в экстремальных формах (пизолит) могут служить агрегатами для стабилизации почвы. Меньшая степень латеризации встречается в латеритных почвах, сформированных в умеренных, теплых и тропических регионах; сюда относятся желтые подзолистые, красные подзолистые, желтовато-коричневые латеритные и великие латеритные почвы.

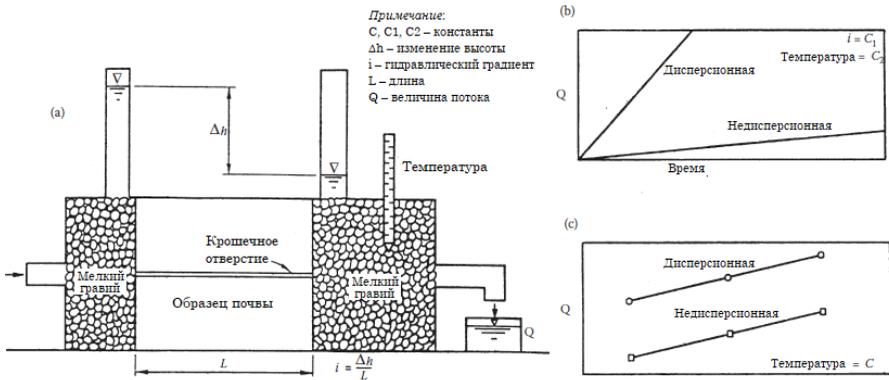


Рисунок 13.13. Характеристики дисперсионных и недиспергирующих глин: (а) аппарат для эрозии малых отверстий WES, (б) величина потока в зависимости от времени и (с) количество потока в зависимости от гидравлического градиента.

Существует ряд классификационных систем, которые были специально разработаны для латеритных материалов. Поскольку эти системы обычно основаны на сельскохозяйственных или минералогических факторах, они не подходят для инженерных целей. Vallerga и Van Til (1970) предложили систему инженерной классификации для латеритных материалов и опубликовали информацию, полученную в Юго-Восточной Азии, в основном в Таиланде.

1. Характеристики пластичности латеритных почв Юго-Восточной Азии варьируются в широких пределах.
2. Система классификации была разработана для латеритных почв, расширив Единую систему классификации. В нее включены параметры для определения характеристик долговечности частиц гравия и песчаного заполнителя и степени пластичности мелкозернистых почв в гравии и песках.

13.9.2. Свойства и основные проблемы

Инженерные свойства латеритных почв обсуждали и обобщили Little (1967), Vallerga и Van Til (1970) и Gidigasu (1975). Описываемые инженерные свойства включают физический состав и характеристики пластичности, твердость и долговечность, прочность, влагоплотность, проницаемость и динамические испытания. В дополнение к этим базовым исследованиям также проводится оценка стабилизации грунта и проектирования покрытия.

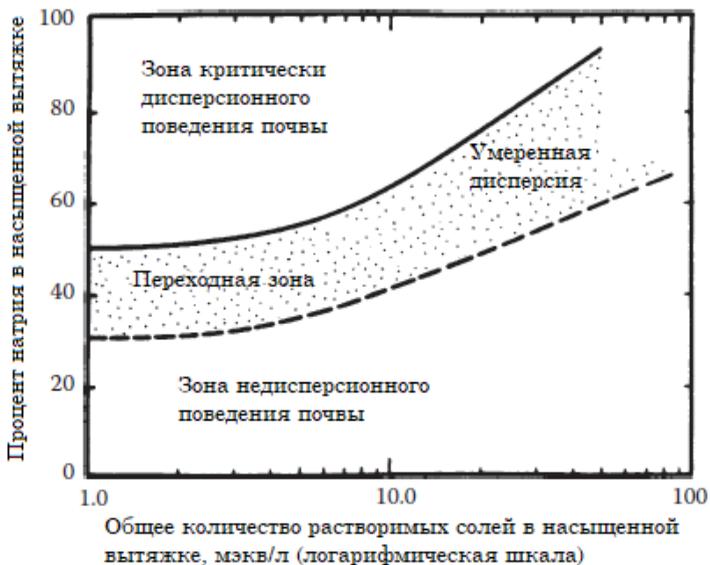


Рисунок 13.14. Определение дисперсионного поведения глинистых почв. Процент натрия = $\text{Na}(100)/\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K}$, все измеряется в мэкв на литр насыщенной вытяжки (по Haliburton, T. A., et al. [1975], Oklahoma State University Report, July, PB-248840. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не подлежит защите авторских прав).

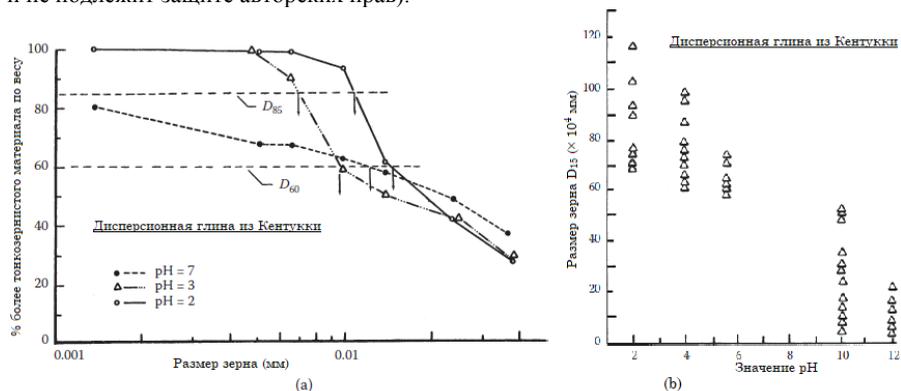


Рисунок 13.15. Влияние поровой жидкости на гранулометрический состав дисперсионной глины: (а) типичные градационные кривые и (b) D_{15} в зависимости от значения pH.

Также рассматриваются экологические аспекты, касающиеся латеритной почвы. В таблице 13.12 представлено сравнение прочностных параметров латеритного грунта в кислой (H_2SO_4) и некислотной (водной) средах, лабораторные испытания на сдвиг и испытания *in situ*. Во всех случаях эти параметры сдвига намного меньше, чем при нормальных условиях (водная среда).

Электрические свойства латеритного грунта были полностью обсуждены в разделе 9.6 и показаны на рисунках 9.6 и 9.24. Сжимаемость латеритного грунта выше в кислотных условиях по сравнению с водой, как обсуждалось в разделе 11.8 и показано на рисунке 11.12.

Таблица 13.12. Сравнение параметров прочности латеритной почвы в кислых и некислотных условиях.

Параметры сдвига	Материал выдержан 5 дней в...	
	воде (H ₂ O)	кислоте (H ₂ SO ₄)
Лабораторное испытание		
Угол трения (φ), град.	22,2	15,2
Коэффициент трения (f)	0,408	0,271
Когезия (c), кПа	87,5	75,5
Измерение <i>in situ</i>		
Проникновение статического конуса, (ps) кПа	3060	1370

Источник: по Sun, Z. C. (1989), Chinese J. Geotech. Eng., v. 11, n. 4, July, pp. 89–93. (На китайском с английскими резюме).

13.10. ОЗЕРНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ И ЛЕНТОЧНЫЕ ГЛИНЫ

13.10.1. Общее обсуждение

Озерные отложения ограничиваются теми осадками, которые отложены в озерах и ручьях, связанных с ледниками плейстоцена, и будут включать те осадки, которые откладываются в озерных бассейнах или в долинах, занятых ручьями, которые имеют некоторые характеристики пресноводных озер, водоемов с солоноватой водой и морских отложений, и, таким образом, удаляются, будучи ограничены теми отложениями, которые обычно называют глинами, но которые содержат различное количество ила, песка и камней. Озерные отложения состоят из мергелей, туфов, глин, илов, песков, гравия, гидроксидов железа, карбоната железа, диоксида кремния, оксида марганца, фосфата кальция, органических веществ и эвапоритов.

13.10.2. Мергели и туфы

Озерный мергель представляет собой смесь карбоната кальция с переменным содержанием примесей. Его цвета разнообразны, но большинство мергелей имеют цвета от серого до белого или бледно-голубого, но красные и черные мергели не редкость. Некоторые мергели имеют карбонат кальция в виде обломков раковин. Утверждается, что мергели образуются только в эпиплимнионе, это может иметь место в некоторых озерах, но бактерии, которые осаждают карбонат кальция, могут присутствовать в илах под гидролимнированием до глубины воды 24 м; известно, что обширные отложения мергелей доходят до больших глубин. Мергели, большая часть которых состоит из раковин брюхоногих моллюсков, скопились на дне зеленых озер в восточном Висконсине на глубине более 60

метров. Эти отложения не образуются в озерах с мягкой водой и не являются обычным осадком крупных озер.

Известковый туф представляет собой известково-карбонатное отложение, более или менее пористое и слоистое. Наиболее обширные месторождения туфа в США – это остатки озер бывшего Лучонсталь в штате Невада. Гидроксиды являются обычными отложениями в некоторых озерах. В некоторых шведских озерах лимонит был отложен до толщины около полуметра на глубине около 10 м. Цвета туфов – оттенки черного и коричневого с добавлением растительного вещества и студенистого кремнезема. Туфы также содержат значительное количество фосфора в форме землистого вивианита и обычно немного оксида марганца, а также значительное количество органического вещества и немного кремнезема.

13.10.3. Ленточная глина

13.10.3.1. Характеристики ленточных глин

Парное расположение слоев в осажденных в воде материалах в ледниковой области отражает сезонные изменения во время осаждения. Мелкий песок и ил, или каменная мука, откладываются в ледниковом озере в течение летнего сезона, а более мелкие частицы обычно осаждаются в более тонком слое зимой (HRB, 1957). Каждая лента состоит из двух слоев, нижний из которых обычно имеет более крупные и светлые зерна. Верхний соответственно имеет более мелкие и темный зерна. Эти отложения хорошо стратифицированы. Разделение парных слоев, каждый из которых почти идентичен тем, которые находятся выше и ниже, характерно для лент и отличает их от других отложений, которые являются слоистыми, но не ленточными.

В ленточных глинах некоторые из слоев могут содержать мало глины или не содержать ее вовсе. Местами происходит переход от типичных ленточных глин к пластам, состоящим из чередующихся гравия и песка. Илистая глина ледникового происхождения обычно состоит в основном из очень тонко измельченных минералов – кварца, полевого шпата и слюдистых материалов, а не из настоящих глинистых минералов. Мелкость зерна, минералогическое строение, большие различия между горизонтальной и вертикальной проницаемостью и, возможно, другие факторы, связанные с нестабильным расположением отдельных частиц, иногда приводят к особым инженерным проблемам.

13.10.3.2. Факторы окружающей среды, влияющие на образование ленточных глин

Многие ленточные глины чувствительны к окружающей среде. Отложения одного озерного бассейна могут значительно отличаться от отложений другого. Факторы, которые могут повлиять на распределение:

- расположение выходного отверстия озера по отношению к ледовому фронту;
- положение ледового фронта относительно озера;
- положение входящих ледниковых потоков;
- перенос материала.

Отложения разнообразных материалов в пределах одного озерного бассейна также могут значительно отличаться. Факторами, влияющими на осаждение в озерном бассейне, являются (1) топография русла (на неровном дне озера, в депрессиях обычно образуются разнообразные отложения) и (2) положение входа ледникового потока.

13.10.3.3. Механические свойства и основные проблемы ленточных глин

Толщина лент, а также толщина отдельных компонентных слоев варьируется от 1/16 до 11/2 дюйма. Может наблюдаться некоторое изменение толщины слоя на одном конкретном участке, и во многих случаях толщина одного слоя уменьшается по мере того, как другой с глубиной увеличивается. Содержание глины колеблется от 10 % до приблизительно 70 %; в некоторых случаях влажность поля меньше верхнего предела пластичности. Почти во всех месторождениях в Онтарио (Канада), как на берегу озера, так и в районах глинистого пояса, влажность поля близка к верхнему пределу пластичности; индекс пластичности составляет около 1,0, а чувствительность обычно составляет порядка 4,0. Рассмотренные ленточные глины имели максимальный верхний предел пластичности около 80 с минимумом около 30. Пределы пластичности варьируются от 18 до 28 с различными показателями пластичности, отражающими различное происхождение и геологическую историю месторождений. В целом было отмечено, что иллит является преобладающим глинистым минералом к востоку от озера Верхнее, в то время как монтмориллонит является преобладающим глинистым минералом к западу от этой точки.

Если нагрузки предварительной консолидации находятся в хорошем соответствии с текущими нагрузками вскрышных пород, это указывает на то, что глины должны быть обычно уплотнены или даже избыточно уплотнены. Однако во многих случаях предварительное сжатие могло произойти из-за ледовых нагрузок. Средняя прочность ленточных глин варьируется от 500 до 1000 фунтов/дюйм², определяемых с помощью испытаний на сдвиг. Озерные отложения и ленточные глины содержат многочисленные слои проницаемого песка и гравия, а также могут содержать значительные количества непроницаемой глины или глинистого ила. Песчано-гравийные отложения часто довольно заметны, но также могут представлять собой покрытые линзовидные отложения, либо изолированные, либо связанные с длинными прожилками из проницаемого материала. Включения или карманы из непроницаемой и часто сильно сжимаемой мягкой глины могут чередоваться с проницаемыми и компетентными песчаными или гравийными пластами. Проектирование фундаментов для легких конструкций обычно не представляет трудностей. Строящиеся тяжелые конструкции могут подвергаться опасности из-за возможности дифференциального оседания.

13.11. СОЛОНЧАКОВЫЕ И СИЛЬНО ЩЕЛОЧНЫЕ ПОЧВЫ

13.11.1. Общее обсуждение

Засоленная почва содержит избыток растворимых солей, однако она является не слишком щелочной. Солончаки могут содержать карбонаты, сульфаты или хлориды. Щелочная почва, в которой натрия 15 % или более от общей обменной емкости, обычно характеризуется значением рН 8,5 или выше (HRB, 1957). Засоленные почвы можно разделить на две категории:

- 1) засоленные почвенные отложения, расположенные вдоль береговой линии, где морские отложения остаются после испарения соленой воды;
- 2) засоленные почвенные отложения, естественным образом существующие во внутренних районах.

13.11.2. Свойства и основные проблемы

Инженерные свойства засоленных и щелочных почв существенно различаются. Углы остаточного трения в зависимости от индекса пластичности (PI) показаны на рисунке 13.16. Большие изменения обнаружены для щелочной почвы. Недавние результаты исследований соленой почвы приведены в работе Wang и соавторов (1996). Основные проблемы засоленных и щелочных почв обсуждаются Watanabe (1977). На рисунке 13.17 отражена скорость коррозии стали в кислых и щелочных почвах по диаграмме Стратфулла.

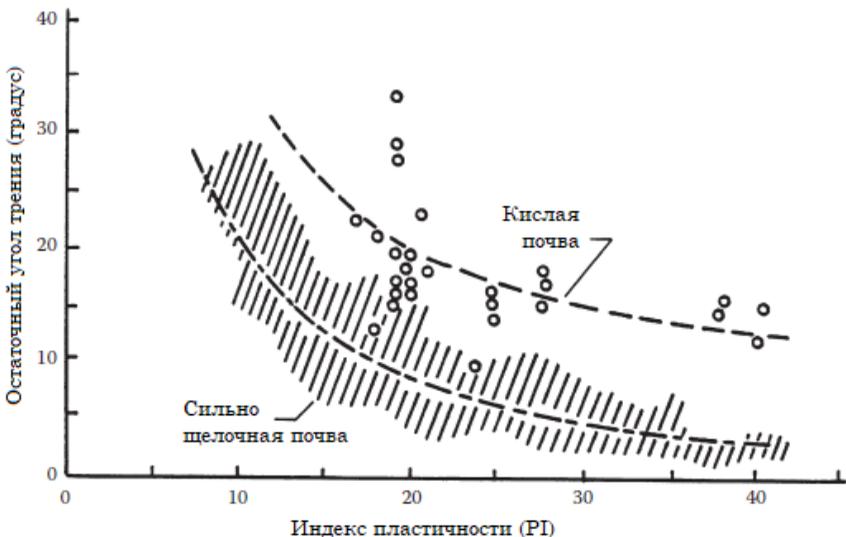


Рисунок 13.16. Угол остаточного трения в зависимости от индекса пластичности для кислых и щелочных почв (по Tianjin Univ. [1978], Soil Mechanics and Foundation Engineering, Chinese Construction Publ., Beijing).

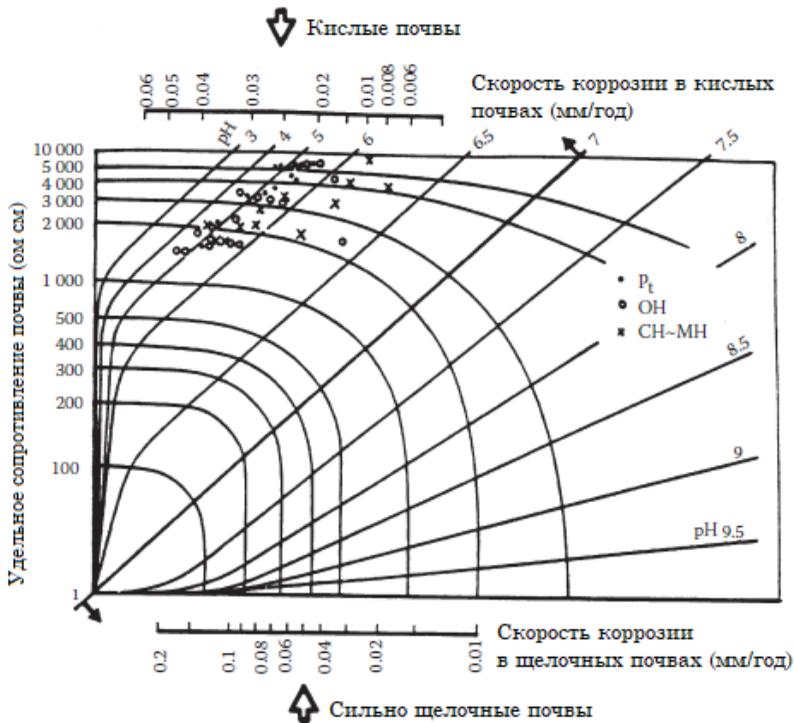


Рисунок 13.17. Оценка скорости коррозии стали в кислых и щелочных почвах по диаграмме Стратфулла (по Watanabe, S. [1977], Engineering Problems of Organic Soils in Japan, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 69–82).

13.12. БЕНТОНИТОВЫЕ ГЛИНЫ

13.12.1. Характеристики бентонитовых глин

Название «бентонит» впервые применил Knight в 1898 году по отношению к высококоллоидной пластичной глине, найденной недалеко от форта Бентон, штат Вашингтон. Hewett (1917) показал, что бентонитовая глина образовалась в результате изменения вулканического пепла *in situ*. Позднее Ross и Shannon (1926) дополнительно изучили названную глину и переосмыслили термин «бентонит», чтобы ограничить его до глин, образующихся при изменении вулканического пепла *in situ*. Ученые указали, что такие глины в основном состоят из монтмориллонитовых глинистых минералов. Примерно до 1930 года бентонит был неизвестен за пределами региона Вайоминг.

В настоящее время бентонит является коммерческим термином и определяется геологической службой штата Вайоминг как светло-серая осадочная порода, которая содержит не менее 75 % глинистых минералов, в том числе бейделлит

или монтмориллонит. Бентонит как природная глина находится в Вайоминге, Южной Дакоте, Миссисипи и других штатах Среднего Запада. Большая часть бентонита в «штате Ковбой» называется «вайоминг» или «западный» бентонит и отличается от пород в других штатов. Бентонит Вайоминга уникален тем, что после смачивания разбухает в 15 раз. Большая часть бентонита в этом состоянии находится в меловых сланцах.

Бентонит является важным материалом для строительства систем контроля отходов, таких как стены из шлама и глиняные подкладки (раздел 17.8). Зачастую бентонит содержит монтмориллонитовые минералы; однако иногда бентонит содержит минералы бейделлита, такие как глины путнам, саскуэханна и луфкин (раздел 4.10). Инженерные свойства этих глин будут обсуждаться в следующем разделе. В общем, бентонит является Na-монтмориллонитом, как отмечалось в разделе 4.10.

13.12.2. Свойства и основные проблемы

Месторождения природной бентонитовой глины расположены в штатах Вайоминг, Южная Дакота, Миссисипи и в других штатах Среднего Запада. Особенностью типа Вайоминга (эта глина из Вайоминга и Южной Дакоты) заключается в мылкой поверхности материала. Это водный силикат оксида алюминия, содержащий около 62 % SiO_2 , 22 % Al_2O_3 , 4 % оксида железа, 4 % оксида магния и кальция и 2 % оксидов щелочных металлов (Brady, 1947). Тип Миссисипи отличается от типа Вайоминга только физическими свойствами. Коммерчески доступный бентонит из Нью-Джерси показан в таблице 13.13. Минералогические аспекты бентонита обсуждались в разделе 4.10. Бентонитовые глины очень чувствительны к местным условиям, как показано на рисунке 13.18.

Таблица 13.13. Физические свойства поставляемого на рынок бентонита¹

Химический состав ²	Весовой процент
SiO_2	56,5
Al_2O_3	20,0
Fe_2O_3	4,8
CaO	1,8
MgO	4,0
K_2O	0,7
Na_2O	3,5
Верхний предел пластичности	418
Предел пластичности	120
Индекс пластичности	298

¹ Бентонит, поставляемый на рынок из Нью-Джерси.

² Химический состав проверен кафедрой геологии Принстонского университета.

Источник: данные Принстонского университета.

Из-за высокой влагоудерживающей способности и свойств набухания бентонитовая глина имеет тенденцию демонстрировать наибольшую величину уплотнения, но его медленную скорость. Бентонитовые почвы сохнут в

наибольшей степени при высыхании. Кроме того, высушенная масса бентонитовой глины, как правило, является более твердой и жесткой, чем масса материала, состоящего из других глинистых минералов. Бентонитовые глины могут поглощать большую часть воды, но они делают это с такой медленной скоростью и в таких условиях, чтобы быть относительно непроницаемыми для всех практических целей. Кажется, что присутствие бентонита будет способствовать предотвращению развития слоев воды и ограничивать движение подземных вод. Однако следует отметить, что бентонитовая глина более чувствительна к местным условиям окружающей среды, чем другие, такие как иллит и каолинит, как обсуждалось в разделе 5.12, особенно когда речь идет о загрязненных поровых жидкостях.

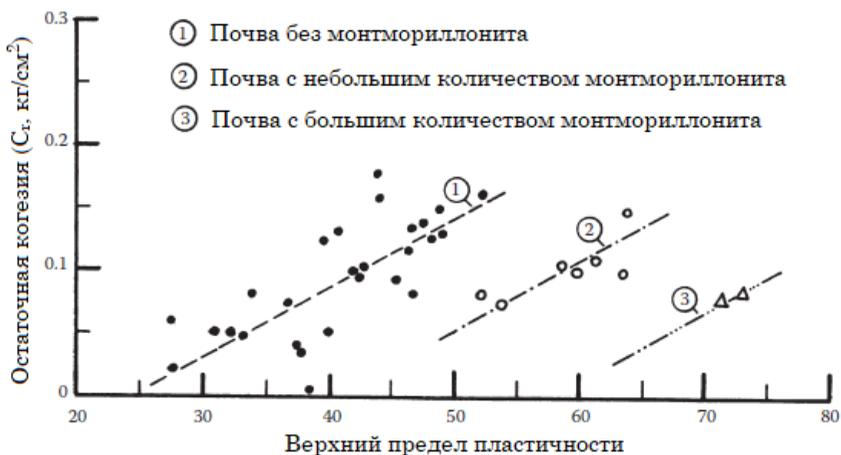


Рисунок 13.18. Влияние количества добавленного бентонита на остаточное напряжение сдвига (данные из Tianjin Univ. [1978], Soil Mechanics and Foundation Engineering, Chinese Construction Publ., Beijing).

13.13. Тейфра, кораллы и морские раковины

13.13.1. Тейфра (вулканический пепел)

Тейфра – это собирательный термин, обозначающий все частицы, выбрасываемые из вулканов, независимо от их размера, формы или состава. Вулканический пепел является частью тейфры и имеет размеры от 1/16 до 4 мм. Вулканический пепел – это устаревшее название для среднезернистой тейфры. В геотехнической инженерии такие термины, как вулканический пепел и зола часто используются для сферы строительства. В качестве вулканического материала использовались вулканическая глина и кораллы, например, они входят в фундамент муниципального офисного здания Гонолулу.

13.13.2. Кораллы и морские раковины

Кораллы – это блестящий твердый известняковый материал, который состоит из скелетов некоторых морских полипов. Их каркасные структуры формируют обширные массы, образуя рифы и часто напоминающие безлистные деревья. Во многих прибрежных регионах они используются в качестве строительного материала для стен и материалов фундамента. Они также использовались для фондов взлетно-посадочной полосы аэропортов. Приблизительно 30 % содержимого кораллового наполнителя может проходить через сито № 200. Глубина коралловых отложений варьируется. Некоторые кораллы смешаны с песчано-гравийной смесью.

Раковины моллюсков и устриц можно найти на берегах прибрежных районов. Их в основном используют для вторичного дорожного покрытия, материалов фундамента или защиты откосов насыпи. Они обычно выкапываются из берегов и сразу же доставляются в указанное место без дробления, просеивания или другой обработки. Процессы дробления и мойки применяются в ограниченной степени, когда оболочки используются в качестве минерального заполнителя для бетонных и битумных смесей для мощения.

13.14. РЕЗЮМЕ

1. Почва в своем естественном виде представляет собой динамическую систему, свойства которой зависят не только от свойств ее составляющих, но также от взаимного расположения и взаимодействия этих составляющих как производных истории системы и ее нынешней динамики.

2. Размещение фундамента в почвенной системе открывает возможности для благоприятных или вредных взаимодействий, которые должны быть предусмотрены и приняты во внимание ответственным инженером.

3. Степень неблагоприятного взаимодействия обычно возрастает с увеличением близости поверхности контакта к поверхности почвы, где суточные и сезонные изменения температуры и влажности достигают максимальных значений и где могут накапливаться вредные соли.

4. Структурная чувствительность связных почв и нежелательная химическая активность засоленных, щелочных и кислых почв хорошо известны. Не так известно то, что даже «инертные» материалы, такие как пески, могут демонстрировать сильно различающуюся несущую способность в зависимости от их конкретного места нахождения.

5. Кроме того, в зависимости от режимов осадения речные и морские пески и гравий могут быть настолько рыхлыми, что, легко выдерживая статические нагрузки, в результате землетрясения они становятся макромеритными жидкостями.

ПРОБЛЕМАТИКА

13.1. Определите процесс выветривания. Какие общие изменения происходят в почвенном материале во время развития почвы?

13.2. Каковы различия между камнеподобными и почвоподобными сланцами?

13.3. Каковы особенности остаточного грунта?

13.4. Каковы причины образования и характеристики набухающей глины?

13.5. Дымовая труба диаметром 14 футов у основания имеет расчетную критическую нагрузку в 1000 тонн (включая расчетный вес фундамента) и опрокидывающий момент в 500 тонн-фут из-за ветра. Стег должен быть построен на юге Пенсильвании в месте, где известно, что верхний слой почвы представляет собой очень мелкий песок толщиной от 25 до 45 футов, содержащий карманы и слои торфа и ила. Под песком находится однородный слой глины толщиной около 80 футов, который, в свою очередь, подкреплен твердой скальной породой. На этапе предварительного проектирования нужно ответить на несколько вопросов.

a) Какого рода буровые работы вы бы провели?

(b) Насколько глубоко вы будете заниматься своими исследованиями?

(c) Какие виды и сколько почвенных тестов вам потребуется? Укажите причины сделанного выбора.

(d) Опишите и нарисуйте средства, которые вы бы использовали, чтобы открыть и поддерживать отверстие, если опора имеет параметры 20 × 20 футов и 10 футов ниже поверхности земли.

13.6. Обсудите различия между лессом, эоловым и выветренным илом.

13.7. Как определить дисперсионную глину в поле?

13.8. Обсудите, как развиваются ленточные глины.

13.9 Чем отличаются бентонитовые и монтмориллонитовые глины? Являются ли Na-монтмориллонит и Na-бентонит одинаковыми породами?

13.10 Известняк – это относительно молодая геологическая формация, которая составляет около 10 % открытых пород на поверхности земли и покрывает большую часть областей США. Известняки часто покрыты слоем остаточной почвы. Остаточные почвы часто бывают мягкими и рыхлыми, поэтому проектировщик высотного здания обычно требует, чтобы фундаменты были поддержаны непосредственно на поверхности горной породы. Однако свойства в известняковом регионе могут значительно отличаться, то есть быть в диапазоне от плохих до хороших на довольно коротком расстоянии. Что бы вы предложили на предварительном этапе проектирования высотного здания в таком регионе?

14. Водно-болотные угодья, прибрежные окраины и проблемы эрозии почвы

Водно-болотные угодья, поймы, прибрежные окраины, дноуглубительные работы и эрозия являются частью важнейших экологических и эколого-геологических проблем. Болотистые районы очень чувствительны к изменениям окружающей среды и особенно подвержены необратимым экологическим нарушениям. В этой главе темы охватывают водно-болотные угодья, прибрежные окраины и эрозию. Кроме того, некоторые проблемы, такие как проникновение соленой воды и парниковые эффекты, также будут обсуждаться. Все объяснения сделаны с эколого-геотехнической точки зрения.

14.1. БОЛОТИСТЫЕ МЕСТНОСТИ

14.1.1. Общее обсуждение

Водно-болотные местности – это общий термин, который относится к болотам, топям, поймам, а также к рисовым полям. Формирование водно-болотных угодий происходит в течение разного времени, особенно техногенных угодий, которые имеют относительно недавнее происхождение, в то время как другие начали свое существование после отступления ледников. Динамика водно-болотных экосистем сложна. В пределах данной области растения и животные, взаимодействующие друг с другом, и их окружение составляют экологическую систему. Экономические, экологические и рекреационные аспекты этих районов в последние годы получили все большее признание. Водно-болотные угодья обеспечивают жизненно важную среду обитания для различных птиц, растений и рыб; это также хранилище для воды и место ее очистки.

Исторический обзор водно-болотных угодий показывает, что, когда европейские поселенцы впервые прибыли в Америку, площадь водно-болотных угодий в районе, который станет 48 штатами, составляла более 200 миллионов акров, согласно недавним оценкам (Brown и Snyder, 1991). Однако к середине 1970-х годов, по данным Службы охраны рыб и дикой природы США (FWS), общая площадь водно-болотных угодий составляла около 100 млн акров. Самое последнее национальное исследование, проведенное FWS за 1954–1974 годы, показало, что чистая потеря составляет более 9 миллионов акров или почти 500 000 акров в год. На развитие сельского хозяйства пришлось 87 % этих потерь, а развитие городов и другое развитие вызвали оставшиеся 8 % и 5 % соответственно.

В водно-болотных угодьях большинство почв относится к органическим почвам. Эти почвы представляют собой твердые составляющие, состоящие преимущественно из растительного вещества на различных стадиях разложения или консервации. Влажность (то есть влага в насыщенных почвах и вода,

затопившая территории) является еще одним особым условием, к которому должны быть адаптированы водно-болотные растения. Существует множество аспектов характеристик водно-болотных угодий. Однако в следующих разделах подчеркиваются только геотехнические аспекты водно-болотных угодий.

14.1.2. Определения, типы и классификации

14.1.2.1. Определения

14.1.2.1.1. Служба охраны рыбы и дикой природы США (FWS) (USDA, 1969)

Земля, где вода является доминирующим фактором, определяет характер развития почвы и типы растительных и животных сообществ, живущих на поверхности почвы. Следует отметить, что FWS США разработала более точную иерархическую систему, с помощью которой каждое водно-болотное угодье может быть нанесено на карту или описано со ссылкой на его общую структуру или растительность, характер наводнения, химический состав воды и типы почвы (Cowardin и соавторы 1979)

14.1.2.1.2. Инженерный корпус армии США (1975)

Те районы, которые в течение длительного времени затоплены или насыщены поверхностными или подземными водами, служат для поддержания в нормальных условиях особой растительности, обычно приспособленной для жизни в условиях насыщенной водою почвы. Следует отметить, что это определение чаще всего используется Министерством транспорта США, как сообщает Thrasher (1983).

14.1.2.1.3. Фонд экологических исследований Пенсильвании (PERF, 1982)

Районы, где вода находится на поверхности или вблизи нее достаточно долго, чтобы быть способной поддерживать водную или гидрофитную растительность, указывают на влажные условия.

14.1.2.2. Типы и классификации водно-болотных систем

Ученые признают (Niering, 1985) пять основных систем водно-болотных угодий: морская, устьевая, озерная, речная и палластринская. Морские и устьевые среды обитания включают прибрежные водно-болотные угодья, такие как приливные болота и мангровые болота. Другие три категории представляют пресноводные системы. Озерные водно-болотные угодья связаны с озерами; речные водно-болотные угодья находятся вдоль рек и ручьев. Палластринские водно-болотные угодья включают болота, топи и трясины. В таблице 14.1 приведены все пять типов водно-болотных угодий, которые обычно используются для обозначения отдельных типов водно-болотных угодий. Палластринские заболоченные территории, перечисленные в таблице 14.1, описаны в следующем разделе.

14.1.2.2.1. Болота

Для болот характерны травянистые растения с мягким стеблем, такие как хвощ и пиккель. В мелких болотах уровень воды доходит до 6 дюймов, в глубоких болотах вода доходит до 2–3 футов. В еще более глубоких болотах даже плавают

и занимаются дайвингом. Некоторые болота зарождаются как мелкие озера и впадины, которые постепенно заполняются разложившейся растительностью.

14.1.2.2.2. Топи

В топях преобладают древесные растения, а именно деревья и кустарники. Как описано в HRB (1957), топь – это полоса стоячей воды, изобилующая определенными видами деревьев и крупной травой или торфяными утолщениями; участок влажной, губчатой земли, насыщенной, но обычно не покрытой водой.

Таблица 14.1. Классификация водно-болотных систем.

Морские системы

Морские водно-болотные угодья (прибрежные водно-болотные угодья)

Приливные болота

Мангровые болота

Устьевые водно-болотные угодья: устье водно-болотных угодий, где река встречается с морем

Пресноводные системы

Озерные водно-болотные угодья: водно-болотные угодья вокруг озер

Речные болота

Водно-болотные угодья вдоль рек

Водно-болотные угодья вдоль ручьев

Заболоченные местности

Болота

Болотистые низменности

Трясины

14.1.2.2.3. Трясины

Трясины – это торфяники, обычно лишённые вышележащего слоя минеральных почв. Торф образуется в результате наращивания и постепенного разложения растительного материала. Согласно HRB (1957), трясина – небольшое открытое болото, дно которого засасывает ногу, если на него наступить. Некоторые из интересных заболоченных мест в Северной Америке – трясины. Они встречаются в основном в ранее оледенелых районах на северо-востоке, в северных и центральных штатах и Канаде. Болота представляют собой необычный источник информации для биологов, а также инженеров-геотехников в области экологической истории континента. Подстилающий торф сохраняет данные в виде ископаемой пыльцы разных видов растений, которые росли в этом районе за последние 10 000–15 000 лет (Niering, 1985).

14.1.3. Природные характеристики водно-болотных местностей

В целом, гидрологический режим является контролирующим элементом экологии водно-болотных местностей, а также окружающей среды. Месторождения в водно-болотных угодьях содержат богатые органические вещества. Это связано с медленной скоростью окисления органических веществ. Столь медленное окисление происходит из-за медленной диффузии O_2 через застойную воду и низкие концентрации минеральных питательных веществ. В теплое время года высокая удельная теплоемкость воды замедляет скорость нагрева торфа. В сухое время года высокое тепловое сопротивление торфа замедляет нагревание ниже непосредственной поверхности. Низкая доступность O_2 сопровождается высоким парциальным давлением CO_2 в большинстве почв и отложений. Равновесие между углекислотой и бикарбонатом имеет тенденцию определять кислотность почвы примерно при pH, равном 6,0. Когда микробная активность замедляется и диффузия CO_2 повышает парциальное давление CO_2 , pH может стать более кислым, если образуются органические кислоты, или более щелочным, если почвенный раствор содержит высокие концентрации Na^+ .

Пойма – это низменность, граничащая с рекой, которая обычно сухая, но подвержена затоплению, когда поток переполняет берега. В пойменных почвах вдоль тропических и субтропических береговых линий и дельт рек могут содержаться значительные количества иона Fe (II). При разливе сульфиды окисляются до H_2SO_4 и кислого иона Fe^{3+} . Кислотность почвы может возрасти до значения pH, равного 2,0 или ниже. Такие условия способствуют высокой фитотоксичности и могут быть изменены в аэробных условиях только путем интенсивного выщелачивания и использования известки. При повторном разливе pH кислых сульфатных почв быстро возрастает до почти нейтрального значения, поскольку Fe (III) и сульфат восстанавливаются до сульфидов и Fe (II).

14.1.4. Рисовые поля (рукотворная заболоченная территория)

Рисовое поле – это искусственное водно-болотное угодье, используемое в сельскохозяйственных целях. Поведение рисовых полей аналогично затопленной почве, но содержание веществ в пойме и на рисовом поле различно. Рисовые поля содержат большое количество удобрений. Поведение углерода (C), азота (N), серы (S), железа (Fe) и марганца (Mg) обычно зависит из того, что перед сбором урожая воду с рисовых поля удаляют, тогда окислительно-восстановительные потенциалы повышаются, концентрации Fe^{2+} и Mn^{2+} снижаются, и азот, сера и углерод окисляются. Когда почвы снова затопляются, наблюдаются обратные реакции. Рисунок 14.1 иллюстрирует влияние условий затопления на поведение рисовых полей. Рисунок 14.1a показывает влияние различных значений pH на время выдержки. Во всех случаях большие колебания значений pH обнаруживаются в течение первых 15 дней. На рисунке 14.1b показано значительное влияние условий дренажа на окислительно-восстановительную реакцию, что отражено в значениях Eh.

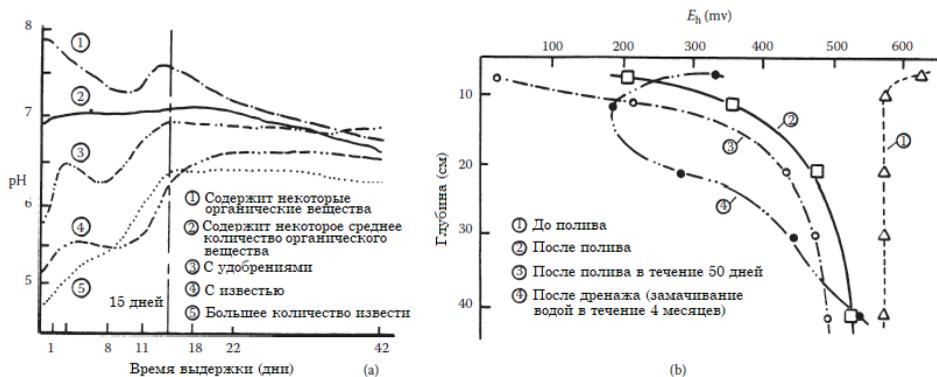


Рисунок 14.1. Влияние условий выдержки на поведение рисовых полей: (а) различные значения pH в зависимости от времени выдержки и (б) влияние глубины на окислительно-восстановительную реакцию (по Yu, T. Y. and Chiang, H. Y. [1984], *Electro-Chemical Properties of Soils*, Scientific Publishing, Beijing).

14.1.5. Экологические геотехнические проблемы водно-болотных местностей

Экологические геотехнические проблемы на водно-болотных угодьях связаны не только с высоким уровнем грунтовых вод и низкой несущей способностью, но также с многочисленными негативными последствиями как в техническом, так и в экологическом аспектах. Процесс оценки воздействия на окружающую среду, как пишет Thrasher (1983), можно разделить на три основных этапа: (1) описание проекта, (2) экологические исследования и (3) оценки воздействия. Описание проекта должно быть предоставлено как можно более подробно. Экологические исследования должны включать оценку биотических и абиотических факторов. Прогнозирование последствий является наиболее важным шагом в процессе, который является частью геоморфологических процессов, как описано в разделе 5.10. Оценка воздействия должна также включать рассмотрение альтернатив и средств обеспечения или усиления положительного воздействия (FHWA, 1978, 1980). Процедурные руководящие принципы для оценки взаимодействия автомобильных дорог и водно-болотных угодий подготовили Erickson и Camougis (1980) и Kent (1994). Некоторые проблемы, связанные с экологической геотехнологией, изложены далее.

14.1.5.1. Экологические эффекты

Экологические эффекты включают в себя пять основных аспектов: (1) уменьшение ареалов животных, (2) изменение биологической продуктивности, (3) изменение потока питательных веществ, (4) удаление естественных систем фильтрации и (5) введение экзотики.

14.1.5.2. Инженерные трудности

Инженерными трудностями на водно-болотных угодьях являются в основном высокое содержание воды и мягкие отложения. Обезвоживание является первой проблемой, связанной с этими трудностями: (1) подавление ливневых вод и

приливов, (2) увеличение мутности воды и (3) изменение режимов циркуляции воды.

Засыпка земли на заболоченных территориях для насыпей шоссе является одной из типичных экологических и инженерно-геологических проблем. Строительство на заболоченных территориях вызывает специфические проблемы, которые заслуживают особого внимания. Например, засыпки земли на заболоченных землях для насыпей шоссе будут вызывать следующие проблемы: (1) гидрологические воздействия, (2) физико-химические воздействия, (3) изменение качества воды и (4) эффекты эрозии и осаднения.

14.2. СУША И ПРИБРЕЖНЫЕ ПОЛОСЫ

14.2.1. Общее обсуждение

Рост населения и деятельность человека привели к многочисленным изменениям и различным экологическим проблемам; изменение наземных и прибрежных сред является одним из основных вопросов, включая те, о которых сообщил Комитет по исследованию экосистем на суше (LMER) Американского геофизического союза (EOS, 1992): (1) уменьшение ареалов животных, (2) преграждение путей распространения воды и осадков, (3) увеличение загрязнения прибрежной среды и (4) увеличение скорости повышения уровня моря (парниковый эффект). Экологические геотехнические проблемы на суше и на побережье требуют информации, такой как характеристики морских отложений, преломление волн, береговые течения, транспортировка песка и т. д. Проблемы, обсуждаемые в этой главе, относятся к:

- вторжению соленой воды;
- лиманам;
- разливам нефти и другим загрязнениям прибрежных районов;
- парниковому эффекту;
- проблемам береговой устойчивости и эрозии.

Быстрые изменения, затрагивающие окружающую среду на суше и в прибрежной зоне, сделали очевидным для многих исследователей необходимость скорейшего понимания и прогнозирования изменений, происходящих во всей прибрежной системе. В частности, необходимо понять, как антропогенные изменения будут влиять на экосистемы в устьях и прибрежных водах и изменять их.

14.2.2. Экосистема на суше и в прибрежной зоне

14.2.2.1. Общее обсуждение

В Морской биологической лаборатории, Вудс-Хоул, штат Массачусетс (1989 год), было проведено исследование участка экосистемы земельной окраины, спонсируемое Американским обществом лимнологии и океанографии и финансируемое Национальным научным фондом. Эксперты в области физической, геологической, химической и биологической океанографии, водной и наземной экологии, микробиологии и рыболовства исследовали изменения в экосистемах на границе суши и моря. Отчет о семинаре под названием «На

границе между сушей и морем: призыв к фундаментальным исследованиям» был напечатан в 1990 году. Его можно получить в Объединенных океанографических институтах. Краткое обсуждение характеристик испытательных площадок и геотехнических свойств окружающей среды представлено далее.

14.2.2.2. Объекты для исследования прибрежных экосистем (LMER)

Выделяются пять LMER. Река Колумбия и залив Томалес расположены на западном побережье, а залив Ваквит, залив Чесапик и остров Плам находятся на восточном побережье. Характеристики каждого объекта кратко описаны ниже.

1. *Река Колумбия*. Река Колумбия имеет эстуарий с большим притоком пресной воды, коротким временем пребывания и относительно сухим водоразделом. В рамках проекта изучаются физико-биологические связи, которые имеют место в зонах максимума мутности лимана в толще воды лимана.

2. *Залив Томалес*. Залив Томалес – это утопленная рифтовая долина средних размеров в прибрежной северной Калифорнии, примыкающая к небольшому водоразделу, в основном покрытому лугами. Проект «Залив Томалес» касается биогеохимических реакций в устьях.

3. *Залив Ваквит*. Залив Ваквит – это небольшой неглубокий залив в Новой Англии, который питается из нескольких лесных и урбанизированных подводных бассейнов.

4. *Чесапикский залив*. Чесапикский залив – это большой срединно-атлантический лиман, с очень большим и сложным водоразделом в умеренном, относительно влажном климате. Исследование сосредоточено на процессах переработки, органическом преобразовании и обмене между нагорьем и морем.

5. *Остров Плам*. Исследование сравнительных экосистем острова Плам, расположенного на побережьях Массачусетса и Нью-Гемпшира. На этом объекте будет изучаться влияние землепользования и взаимодействия органических веществ с питательными веществами на трофическую динамику устья.

14.2.2.3. Устьевые характеристики объектов LMER

Существующие участки LMER предоставляют широкий спектр сведений об устьевых характеристиках, обобщенных в таблице 14.2. Объекты различаются по размеру, глубине, свойствам водосбора, климату, динамике воды, качеству воды и биологии. При рассмотрении таблицы 14.2, становится ясно, что эти соотношения потоков показывают большой диапазон между объектами LMER, от довольно быстрого обновления в реке Колумбия до медленного в Заливе Томалес. Скорости седиментации в системах LMER варьируются в зависимости от выхода наносов в водосборном бассейне, землепользования, отношения площади водосбора к площади водоприемника и эффективности улавливания частиц. Приливный режим всех этих систем полусуточный, но диапазон приливов меняется трижды. Энергия, связанная с пресной водой, является наибольшей в реке Колумбия.

Таблица 14.2. Экологические геотехнические характеристики объектов LMER

	Чесапик	Томалес	Ваквит	Колумбия
Площадь водоема, км ²	11,478	28	6,3	420
Средняя глубина водоема, м	9	3,1	0,9	10
Средний диапазон прилива, м	0,5	1,0	0,7	1,7
Приливная призма, 10 ⁻⁵ м ³	1 720	28	4,4	680
Площадь водосбора, км ²	164 188	570	46	660 500
Максимальная высота водосбора, м	1220	794	100	3500
Сток, 1000 м ³ /сутки	190 000	400	0	600 000
Расход подземных вод, 1000 м ³ /сутки	10 000	15	115	20 000
Сброс сточных вод, 1000 м ³ /сутки	5 410	0	0	1000
Количество осадков, мм/сут	2,7	2,7	3,3	1,3
Испарение, мм/сутки	1,3	1,4	1,8	0,7
Приток пресной воды / приливная волна (отношение потока)	0,066	0,008	0,015	0,486
Масштаб водосбора	14 500 000	11 000	11 500	4 000 000
Диапазон солености, ‰	0–30	0–38	0–32	0–33
Температурный диапазон, °С	–1–30	5–23	1–20	0–23
Диапазон DIP, мкМ	0–4	0,3–7	0–3	0,3–2,2
Диапазон NO ₃ , мкМ	0–250	0–90	0–50	0,5–40
Диапазон NH ₄ , мкМ	0–50	0–11	0–30	0,3–6,6
Диапазон содержания хлорофилла, мкг/л	1–500	0,2–60	0–190	0,5–20
Средняя первичная продукция по фитопланктону, г/м ² /год	450	330	200	100
Общий вклад наносов, 10 ⁻⁶ тонн/год	5,5	0,3	0,02	5
Средняя скорость оседания, см/год	0,2–1,5	0,8	0,2	0,5
Диапазон общего содержания взвешенных веществ, мг/л	5–300	0–200	–	1–1000

Примечание: LMER – участки исследования экосистем суши.

Источник: по LMER (1992), EOS 73, Nov. 10, AGU, p. 481

14.2.3. Основные параметры, необходимые для оценки

14.2.3.1. Общее обсуждение

Прибрежные местности подвержены как антропогенным, так и природным неблагоприятным факторам окружающей среды, таким как волны, приливы, тайфуны, лед, землетрясения, морские древоточцы и, наконец, антропогенное влияние, например, загрязнение. Зонирование или микрозонирование геоэкологических и климатологических условий является основным фактором, влияющим на устойчивость морских сооружений. Необходимо изучить эти условия, прежде чем можно будет приступить к окончательному проектированию и строительству прибрежных и морских сооружений. На рисунке 14.2 представлен схематический эскиз элементов береговой линии, включая пляж и прибрежные районы. Пояснения к рисунку 14.2 будут обсуждаться в разделе 14.4.

14.2.3.2. Характеристики океанских волн

Волны порождаются ветрами. Характеристики волн могут быть определены скоростью ветра, его продолжительностью и протяжением области образования волн. *Протяжение области образования волн* – это горизонтальная длина генерирующей области (в направлении ветра), по которой дует ветер. Когда волны приближаются к прямому берегу под углом, они имеют тенденцию качаться параллельно берегу из-за замедляющего эффекта мелкой воды. Такой изгиб волн называется отражением, как писал Krumbain (1950). При изучении прибрежной окраины, необходимо изучить погодные условия вокруг строительных площадок и близлежащих районов. Для изучения прибрежных и морских объектов, область видимости вокруг строительных площадок также должна быть изучена.

14.2.3.3. Климатологические и геоэкологические условия вдоль береговой линии

В прибрежных районах земли, как правило, делятся на три основных типа: (1) скальный утес, (2) рыхлый песчаный пляж и (3) мягкие глинистые отложения. Все они заключают в себе сложные инженерные проблемы. Кроме того, климатологические и геоэкологические условия тесно связаны с этими проблемами. Далее в качестве примера мы используем особые сведения, полученные при исследовании береговой линии Китая. Чтобы проиллюстрировать некоторые особенности, обсуждаются следующие аспекты.

Известно, что вдоль побережья Китая находятся несколько сейсмических и вулканических зон, таких как вулканические горные цепи и сейсмические зоны вокруг острова Тайвань, проливов Тайвань и регионов Южно-Китайского моря. Эти условия окружающей среды вызывают проблемы как во время, так и после землетрясений; повторное сотрясение обычно наносит такой же ущерб, как и сами землетрясения. Недавними примерами этого явления являются землетрясение в Нортридж (штат Калифорния) в 1994 году и землетрясение в Кобе (Япония) в 1995 году.

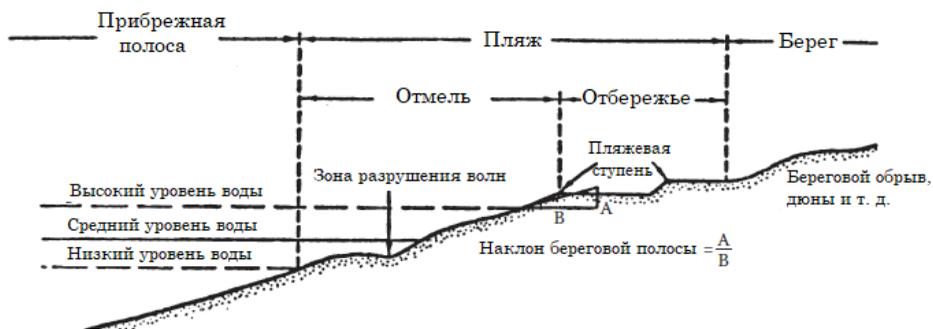


Рисунок 14.2. Схематическое изображение элементов прибрежной окраины (по Beach Erosion Board [1963], Annual Bulletin of the Beach Erosion Board, Department of the Army, Corps of Engineers, v. 17, July, 99p. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не подлежит защите авторских прав).

Большинство регионов охлаждаются пассатами, дующими в течение всего года. Ураганы также являются важной особенностью такого климата. Ураган в северной части Тихого океана называют тайфуном или тропическим циклоном. В южной части Китая часто бывают периоды нестабильной погоды с продолжительными дождями, периодами сырости, штормами, а иногда и метелями, вызванными центрами низкого давления, которые называются депрессиями. Депрессии возникают, когда холодные воздушные массы из полярных регионов встречаются теплые воздушные массы из тропиков. Тайфун – это сильная буря, когда ветер дует по спирали внутрь к центру низкого давления. Скорость ветра колеблется от 65 до 174 узлов в час. Ураганы могут быть до 483 км в поперечнике и могут двигаться со скоростью примерно до 174 узлов в час. Они наносят огромный ущерб как прибрежным, так и морским сооружениям и оставляют широкий след разрушения. Большинство тайфунов чаще всего приходят из области, окружающей Филиппинские острова. Поведение ветра вокруг острова Гонконг и прибрежной зоны Южного Китая обсуждалось в разделе 12.3.

Другие проблемы связаны с ливнями, океаническими течениями и отклонившимися льдинами; все это влияет на устойчивость прибрежных или морских сооружений. В период строительства также необходима другая информация, в частности о характере тумана.

14.2.4. Экологические геотехнические проблемы

В большинстве прибрежных районов имеется большое количество месторождений мягкой глины, в частности в Новом Орлеане, Бангкоке, Шанхае и многих других регионах. Мы используем в качестве примера месторождение мягкой глины Шанхайского региона. Мягкие аллювиальные отложения покрывают большие площади населенной нижней долины Янцзы. Сравнения различных месторождений мягкой глины вдоль береговой линии Китая и в других местах обобщены и обсуждены в разделе 13.6. В дополнение к мягким глинистым залежам вокруг береговой линии в этих регионах часто встречаются особые типы материалов, такие как смеси кораллов и раковин с почвой. Эти типы почв были обсуждены в разделе 13.13.

14.3. ПЛЯЖИ И ПЛЯЖНАЯ ЭРОЗИЯ

14.3.1. Характеристики пляжей и пляжных песков

14.3.1.1. Характеристики пляжей

Пляж расположен между водным и береговым районами. Для удобства описания совет по эрозии пляжей также разработал классификацию пляжных склонов. Следующая система классификации (таблица 14.3) основана на геометрическом соотношении, где каждый класс имеет удвоенный наклон по отношению к предыдущему классу. Как показано на рисунке 14.2, пляж – это зона между линией низкого уровня воды и береговым уступом, которая образует сухопутную границу пляжа. Отмель – это та часть пляжа, которая простирается от

низовья до гребня пляжевой ступени, если пляжевая ступень вообще есть. Она определяется как почти горизонтальная поверхность пляжа, которая простирается вдаль от моря за нормальные пределы волнения. Пляжевая ступень может на самом деле иметь пологий склон к сухопутной границе пляжа. На некоторых пляжах могут присутствовать несколько уступов, образованных в результате различных волновых условий. От гребня ступени до сухопутной границы пляжа проходит береговая линия, которая подвержена воздействию волн только в необычных штормовых условиях. Наклон береговой полосы измеряется на линии высокого уровня воды и выражается как 1 к 25 и т. д. Как отмечено на рисунке 14.2, наклон составляет A/B. Дальнейшее обсуждение, касающееся пляжной инженерии, можно найти в работе Krumbein (1950).

Таблица 14.3. Классификация пляжных склонов

Классификация	Склоны
Мелководная банка	Менее 1 на 120
Умеренный склон	От 1 на 120 до 1 на 60
Отлогий склон	От 1 на 60 до 1 на 30
Пологий склон	От 1 на 30 до 1 на 15
Крутой склон	Больше чем 1 на 15

Источник: по Beach Erosion Board (1963), Annual Bulletin of the Beach Erosion Board, Department of the Army, Corps of Engineers, v. 17, July, 99 p.

14.3.1.2. Характеристики пляжного песка

Из-за классифицирующего действия волновой атаки на береговой материал и морского массопереноса большинство морских месторождений имеют относительно небольшой размер частиц, как показано в таблице 14.4. Эти относительно однородные отложения подвержены разжижению в результате землетрясения (раздел 11.9). Кроме того, их коэффициент пустотности обычно превышает их критический коэффициент пустотности (CVR), и, следовательно, они находятся в потенциальном жидком состоянии. Они могут быть превращены в настоящие макромеритические жидкости не только в определенных зонах сдвига, но и во всей гранулированной системе. Относительно небольшие энергии, такие как технические шумы, вибрации или незначительные землетрясения, действующие на отложения, могут вызвать разрушение склона.

Таблица 14.4. Характеристика частиц пляжных песков.

Местоположение		Характеристики частиц: гранулометрические Константы		
		D ₁₀	D ₆₀	C _u
Аляска	Адак	0,25	0,48	1,9
	Атту 0,40 1,03 2,6			
	Кадьяк	0,25	0,30	1,2
	Уналаска, Брод Бэй	0,64	1,18	1,9
Зона Панамского канала	Залив Брод	0,15	0,33	2,2
	Пляж Пима	0,18	0,42	2,3
	Пляж Венадо	0,38	1,15	3,0
Куба	Пляж Виндмилл	0,63	1,15	1,8
	Бухта Конехо		0,30 0,48	1,6
Флорида	Дейтона Бич	0,15	0,20	1,3
	Пляж Блю	0,48	1,45	3,0
Гуам	Пёпл Бич	0,20	0,68	3,4
	Пляж Тараге	0,20	0,65	3,3
	Пляж Тумон	0,20	0,55	2,8
Гавайские острова	Хило	0,07	0,23	3,2
	Оаху, Барберс Пойнт	0,41	0,75	1,8
	Перл-Харбор	0,47	0,90	1,9
Гонконг		0,42	0,82	2,2
Маршалловы острова	Кваджалейн	0,60	1,50	2,5
Массачусетс		0,15	0,24	1,6
Мидуэйские острова		0,20	0,44	2,2
Нью-Джерси	Спринг-Лейк	0,30	0,60	2,0
Панама	Пляж Табога	1,43	2,81	2,0
	Риу-Гранди	0,25	0,38	1,5
	Пляж Нэви	0,25	0,43	1,7
	Пало Секо	0,15	0,30	2,0
	Плайя, Гранде	0,80	1,03	1,3
	Порт Мальдонадо	0,35	0,39	1,4
Эль-Сальвадор	Сан-Сальвадор	0,38	0,76	2,4
Тайвань	Тайбэй	0,46	0,92	2,3
Тринидад	Маккуэри Бэй	0,18	0,38	2,1
Виргинские острова	Французский залив	0,53	0,90	1,7

Примечание: все образцы отбираются при низком уровне воды; D₁₀ – эффективный размер; D₆₀ – 60 % размера; C_u (коэффициент однородности) = D₆₀/D₁₀, D₁₀ и D₆₀ в мм.

Источник: по Chaney, R. C. and Fang, H. Y. (1986), Static and dynamic properties of marine sediments: A state-of-the-art, ASTM STP 923, pp. 74–111.

14.3.2. Проблемы эрозии и загрязнения пляжа

Эрозия берега или пляжа является распространенной проблемой в песчаных прибрежных или озерных районах, например, на северном побережье Лонг-Айленда в Нью-Йорке, где дома в определенных районах находятся под угрозой. Исследование, проведенное Морским научным центром Государственного университета Нью-Йорка в Стони-Брук, показало, что прибрежные скалы,

некоторые из которых достигают высоты 150 футов, разрушаются со скоростью 1–3 фута в год.

В последнее время загрязнение пляжей также является проблемой, описанной на газетном отчете за 1995 год, в котором перечислены источники загрязнения, отмеченные в 584 заключениях или рекомендациях, связанных с переполнением канализации. В Калифорнии насчитывается 910 заключений и рекомендаций. На втором месте – Нью-Джерси, где проводится самая комплексная программа пляжного тестирования, – 238. Затем – Нью-Йорк с 227, Флорида с 215 и Коннектикут с 162. Число заключений и рекомендаций в 1994 году в других штатах и на территориях, где проводился мониторинг: Висконсин, 148; Огайо, 96; Мэриленд, 82; Массачусетс, 58; Иллинойс и Индиана, по 36; Мичиган, 26 лет; Гавайи, 16; Мэн, 15; Пенсильвания, 14 лет.

14.4. ПРОНИКНОВЕНИЕ СОЛЕННОЙ ВОДЫ, ЭСТУАРИИ И ЭФФЕКТ ТЕПЛИЦЫ

14.4.1. Общее обсуждение

Вторжение соленой воды – это движение соленой воды из океана в прибрежные водоносные горизонты и на берег из-за переполнения грунтовых вод; это проявление динамического равновесия движения грунтовых вод. В прибрежных районах последовательная откачка также вызовет проникновение соленой воды, что приведет к возможности загрязнения подземных вод и коррозии подземных сооружений. Пресная и соленая вода рассматриваются как две несмешивающиеся жидкости; они разделены поверхностью раздела с уклоном.

14.4.2. Лиманы и устьевые системы

Расширенное русло устья реки, в котором ощущается влияние приливов, известно как эстуарий или лиман. Проще говоря, лиман – это место, где река (пресная вода) встречается с морем (соленая вода). Лиманы являются хрупкими и легко разрушаемыми и считаются важной частью экосистем на Земле. Они служат питомниками и местами нереста и нагула для большой группы морских обитателей, а также служат приютом и местом кормежки для птиц и диких животных. Есть много принятых определений для устьев, которые зависят от точки зрения наблюдателя. Наиболее часто используемое определение взято из работы Pritchard (1952): «Устье – это полузамкнутый прибрежный водоем, который имеет свободную связь с открытым морем и внутри которого морская вода измеримо разбавлена пресной водой, полученной из дренажа земли». Большинство инженеров просто характеризуют устье как область взаимодействия пресной и соленой воды (Kennish, 1996).

Взаимодействие пресной и соленой воды обеспечивает циркуляцию воды и процессы смешивания, которые обусловлены различиями в плотности между двумя типами вод, как показано на рисунке 14.3. Плотность соленой воды зависит от солености и температуры. В эстуариях диапазон солености большой, а

диапазон температур невелик. Поэтому соленость оказывает наибольшее влияние на поведение соленой воды в устьях.

Лиманы образуются в узкой пограничной зоне между морем и суши. Их форма и масштабы постоянно изменяются в результате эрозии и отложения осадков. Резкие эффекты вызваны небольшим повышением или понижением уровня моря. Хотя жизнь большинства лиманов коротка, они оказались важным фактором в развитии мировой окружающей среды. Они имеют высокий приток питательных веществ с суши, но имеют тенденцию к меньшему разнообразию жизни, чем в других водных средах. Отдельные виды многочисленны, но они специализированы и часто приспособлены к существующим экстремальным значениям солености и температуры.

Лиманы были главными центрами развития человека из-за их плодородных вод и навигационного доступа к земле. Развитие торговли и промышленности привело к неизмеримому нарушению естественного баланса в устьях. На топографию устья напрямую влияет обезлесение. Это связано с тем, что вырубка лесов увеличивает сток с суши, сбросы и наносы в реке. Необходимо изучить эти эффекты, чтобы предотвратить дальнейший ущерб окружающей среде. Основным недостатком при изучении лиманов является то, что речной сток, диапазон приливов и распределение наносов постоянно меняются. Таким образом, некоторые устья могут никогда не достичь устойчивых условий. Из-за взаимодействия стольких переменных нет двух одинаковых лиманов. Никто не знает, соблюдаются ли общие принципы или уникальные механизмы.



Рисунок 14.3. Эстуарии (лиманы) – места, где пресная вода взаимодействует с соленой водой.

14.4.3. Воздействие парникового эффекта на прибрежную среду

Теория говорит, что определенные газы в атмосфере действуют как парниковые стекла, пропуская солнечный свет, но не позволяя теплу уйти. В таком случае это называется парниковым эффектом. Ожидается, что увеличение концентрации углекислого газа (CO_2) в атмосфере и других газов вызовет глобальное потепление, которое может поднять уровень моря на несколько футов

в следующем столетии. В 1982 году Управление по охране окружающей среды США организовало проект для оценки величины будущего повышения уровня моря. С эколого-геотехнической точки зрения, если уровень моря поднимается, появляется больше водно-болотных угодий, что вызывает такие проблемы, как эрозия побережья, проникновение соленой воды, проблемы с фундаментом и стабильность склонов на окраинах побережья. Эти последствия повышения уровня моря создают различные опасные отходы в прибрежных поймах, как сообщают Barth и Titus (1984) и Demars и Long (1991).

Потеря прибрежных водно-болотных угодий из-за повышения уровня моря является одной из основных проблем, вызванных парниковым эффектом. Прогнозируется, что уровень моря повысится между 1,4 и 2,2 м к 2100 году в ответ на глобальное потепление. По оценкам, повышение уровня океана на 1 м во всем мире привело к созданию 50 миллионов экологических беженцев из разных стран, что сегодня более чем в три раза превышает число во всех признанных категориях беженцев. Повышение уровня моря за такой короткий промежуток времени также приведет к потере прибрежных водно-болотных угодий (Chaney и Demars, 1991).

Колебания положения уровня моря относительно суши могут быть вызваны эвстатическими, изостатическими и тектоническими силами, действующими независимо или совместно. Эвстатические колебания описывают изменения уровня моря как следствие изменения объема воды в глобальном океане, обычно связанного с аккрецией или таянием континентальных ледниковых щитов. Более высокий средний уровень моря увеличит частоту затопления и усугубит ущерб от наводнений. Это приведет к затоплению плодородных дельт, что приведет к потере продуктивных сельскохозяйственных земель и увеличит засоление и без того засоленных водоносных горизонтов, водотоков и лиманов. Увеличение расходов на реконструкцию, восстановление и укрепление систем береговой охраны может оказаться неподъемным для большинства пострадавших стран.

14.5. МОРСКИЕ ОСАДКИ И ПРОБЛЕМЫ МОРСКОГО ДНА

14.5.1. Морская среда

В целом, дно океана можно разделить на два основных региона: континентальные окраины и океанические бассейны. Континентальные окраины включают континентальный шельф и континентальный склон и составляют лишь небольшой процент от общей площади океана. Морская среда является преимущественно осадочной, а не эрозионной средой. Как следствие, морские отложения проявляют большую однородность, чем обычно отложения на суше. Как правило, морские отложения широко классифицируются на предмет того, являются ли отложения наземными (терригенными) или являются результатом морской активности (пелагические). Пелагические отложения могут быть разделены на неорганические или органические материалы. Неорганические пелагические материалы обычно представляют собой материал с зернистостью, подобной глине. Месторождения с пелагической глиной в основном

обнаруживаются в районах крупных пустынь. Органические материалы – это прежде всего скелетные остатки морских организмов.

Существуют три основных типа глубоководных месторождений: коричнево-красные глины, известковый ил и кремнистый ил. Термин «ил» означает, что более 30 % осадков имеют биотическое происхождение. Экваториальная и полярная области особенно высоки в органической продуктивности. Они имеют известняковые отложения на глубинах менее 470 м и кремнистые в глубоких водах. В областях с меньшей биотической активностью известковый ил обнаружен на мелководье, а коричнево-красная глина – на глубине. Известковый ил непластичен, имеет цвет от кремового до белого, с частицами размера ила, которые легко разрушаются. Некоторые илы содержат от 50 до 100 % воды. Кремнистый ил состоит в основном из остатков скелетов кремнистых растений, которые находятся в большом поясе вокруг Антарктики. Коричневая глина континентального происхождения, переносимая ветром и/или водой, встречается в большинстве более глубоких частей океана. В прибрежных окраинах некоторые морские отложения содержат высокий процент глины (от 35 % до 60 %) и ила (от 40 % до 60%), а значение чувствительности колеблется от 1,6 до 26,0, поэтому отмечается, что отложения находятся в потенциальном макромеритном жидком состоянии и могут стать фактическими жидкостями после разрушения их межчастичных связей. Любое искусственное нарушение в течение периода строительства значительно снизит прочность и несущую способность, так как разжижение морских отложений является важным фактором для анализа и проектирования.

14.5.2. Свойства морской воды

Океан на самом деле представляет собой обширный раствор ионов и других веществ, в котором существуют растения и животные. Большинство растворенных составляющих океана – это ионы. Диапазон приземной температуры морской воды составляет от 35°C в экваториальных широтах до точки замерзания или –2°C в полярных широтах. Основная масса морской воды имеет температуру менее 6°C, а почти половина – ниже 2°C. Градиент температуры – это скорость изменения температуры с глубиной, а также скорость, связанная с широтой. Указано, что примерно 200 м верхнего поверхностного слоя сильно подвержены сезонным колебаниям или изменениям окружающей среды (Bennett и соавторы 1991).

Термины «соленость» и «хлорность» используются для характеристики свойств морской воды. Соленость, определенная океанографами, представляет собой массу в граммах твердых веществ в 1 кг морской воды, испаряемой до постоянной массы при 480°C. Поскольку относительные количества растворенных веществ несколько инвариантны, соленость морской воды может быть напрямую связана с хлорированностью морской воды. Хлорность определяется как количество граммов хлорид-иона (Cl⁻), бромид-иона (Br⁻) и йодида (I⁻), содержащихся в 1 кг морской воды. Экспериментально наблюдаемую связь между соленостью и хлорностью описал Dickson (1974):

$$S = 1,805 (C) + 0,03 \quad (14.1)$$

где S – соленость (грамм на килограмм морской воды), а C – хлоридность (грамм на килограмм морской воды).

Соотношение между температурой, соленостью и плотностью морской воды является линейным. Для данной плотности морской воды, когда температура увеличивается, процент солености также увеличивается. Как указано в разделе 5.5, океан на самом деле представляет собой обширный раствор ионов. Следовательно, электропроводность морской воды важна, как описано в разделе 9.4.

14.5.3. Техническое поведение морских отложений

Геотехнические характеристики морских отложений определяются их расположением в морской среде во время осаждения. Типичные геотехнические свойства морских глин приведены в таблице 14.5. Современный обзор технических свойств дали Chaney и Fang (1986). Однако некоторые особенности экологических аспектов морской глины дополнительно обсуждаются далее.

Влияние поровой жидкости на канадскую высокоструктурную глину, отраженное на верхнем пределе пластичности, представлено на рисунке 14.4. Лабораторные эксперименты проводились по температурным воздействиям с помощью теста на консолидацию. Образцы почвы были получены из морской глины дельты Миссисипи, результаты испытаний представлены на рисунке 14.5. Температурные колебания составляют от 5°C до 22°C. Коэффициент консолидации рассчитывается по обычному методу Касагранде. Во всех случаях важную роль играют как температура, так и давление уплотнения.

14.5.4. Загрязнение и загрязненные морские отложения

За последние несколько десятилетий многочисленные промышленные и городские отходы сбрасывались в землю, реки и океаны, особенно в районах с высокоиндустриальными портами, где расположены прибрежные сооружения. Все виды загрязнения оказывают прямое или косвенное воздействие на почвенно-водные системы. Коррозия является одной из основных проблем в морской среде. Кислотный дождь и соленый ветер влияют на многие открытые морские сооружения.

Биологическая атака является основной причиной повреждения деревянных конструкций в районах портов и может происходить в любой части прибрежных или морских сооружений. Основными организмами, которые атакуют деревянные конструкции, являются морские бурильщики и грибы. Географическое распределение морских скважин вдоль побережья США и Китая представлено в таблице 14.

Коррозия, вызванная микроорганизмами в морской среде, представляет потенциальную опасность для всех прибрежных или морских сооружений. Метаболические процессы, происходящие на металлических поверхностях

раздела, оказывают значительное влияние на различные реакции коррозии. Некоторые из основных механизмов, с помощью которых микроорганизмы инициируют или ускоряют коррозию, обсуждались в разделе 5.11. Скорость биологической атаки зависит от уровня содержания растворенного кислорода в прилегающей воде и температуры воды; следовательно, Южно-Китайское море имеет больше проблем, чем Желтое море или Бохайский залив, как показано в таблице 14.6.

Таблица 14.5. Типичные геотехнические данные, касающиеся морских месторождений.

Параметры	Диапазон
Размеры, состав, %	
Глина, 2 мкм	35–60
Ил	40–60
Песок	10–
Глинистые минералы, %	
Иллит	60–75
Каолинит	10–
Монтмориллонит	5–20
Физические свойства	
Содержание влаги (<i>in situ</i>)	60–180
Деятельность (A)	0,33–1,33
Чувствительность	1,60–26
Верхний предел пластичности (LL)	72–121
Предел пластичности (PL)	34–51
Эквивалент влажности поля	65–78
Эквивалент влажности центрифуги	55–68
Предел усадки (SL)	7–10
Коэффициент пустотности (<i>e</i>)	0,5–9,0
Индекс сжатия (<i>C_c</i>)	2,3

Источник: данные из: Winterkorn, H. F. and Fang, H. Y. (1975, 1991); cited by Chaney, R. C. and Fang, H. Y. (1986), Static and dynamic properties of marine sediments: A state-of-the-art, ASTM STP 923, pp. 74–111.

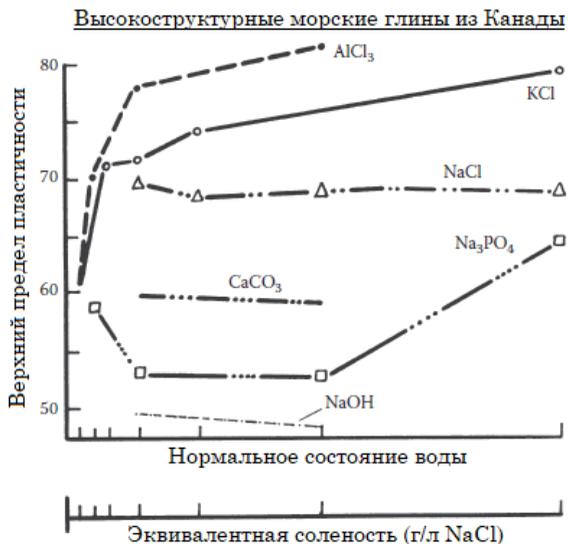


Рисунок 14.4. Влияние поровой жидкости на верхний предел пластичности морских глин (по Torrance, J.K. [1975], Can. Geotechn. J., v. 12, n. 3, pp. 326–335).



Рисунок 14.5. Влияние температуры на коэффициент уплотнения глины из дельты Миссисипи (протестировано М. Perlow из Университета Лихай).

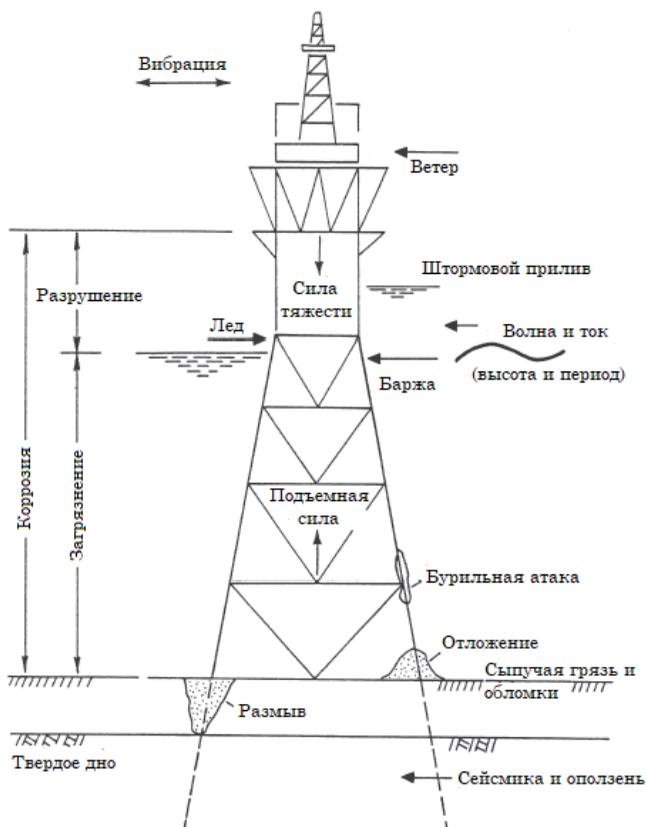


Рисунок 14.6. Некоторые факторы, влияющие на структуру платформы.

14.5.5. Морские сооружения и склоны

14.5.5.1. Морские сооружения

Прибрежные и морские сооружения являются основной частью морских структурных систем. Общая прибрежная зона, прилегающая к пляжу, обычно определяется как зона, бесконечно направленная наружу от линии низкого уровня воды (на рисунке 14.2), хотя существует некоторая тенденция определять данную зону между линией низкого уровня воды и глубиной 30 футов как прибрежную зону или площадь, где водная зона имеет глубину более 30 футов. Глубина морской платформы была увеличена с 6 м в 1947 году до более 300 м в 1978. Прибрежные и морские сооружения подвергаются воздействию крайне неблагоприятных условий окружающей среды. Эти условия схематически показаны на рисунке 14.6, а сводная информация о различных причинах нестабильности системы фундамент–основание представлена в таблице 14.7.

Рисунки 14.6 и 14.7 показывают, что морские сооружения постоянно испытывают как антропогенные, так и природные нагрузки окружающей среды, такие как волны, течения, тайфуны (ураганы), лед, землетрясения, морские бурильщики и т. д.

Таблица 14.6. Географическое распространение морских бурильщиков.

Морские породы	Атлантическое побережье	Тихоокеанское побережье	Побережье Мексиканского залива	Южно-Китайское море
Bankia (различные виды)	от Массачусетса до зоны канала	от Залива Аляски до зоны канала	Флорида, Техас	Хайнань Дао; Чжунша Цундао
Limnoria lignorum	от Мэна до пролива Флориды	от Аляски до зоны канала	a	Наньша Кундао; Чжунша Кундао; Филиппины
Limnoria quadripunctata	Багамские и Бермудские острова	Калифорния; Калифорнийский залив	Флорида, Техас	Гонконг; Сиша Кундао; Чжунша Цундао
Limnoria tripunctata	от Нью-Гэмпшира до зоны канала	от Калифорнии до Мексики	от Флориды до Техаса	Тонкинский залив; Хайнань Дао; Сиша Кундао
Martesia striata	от Северной Каролины до зоны канала	Нет данных	Флорида, Техас	Гуам; Хайнань Дао; Гонконг
Teredo (различные виды) ^a				

^a Распространены на побережьях Атлантического, Тихого и Персидского заливов, а также в Южно-Китайском море.

Источник: данные из Brackett, R. L. et al. (1982), Report TN-1624, Naval Civil Engineering Laboratory, CA; Fang, H. Y. and Chaney R. C. (1986) ASTM STP 923, ATSM, Philadelphia, PA; и другие.

14.5.5.2. Склоны подводных отложений

Опасные условия существуют у подножия склонов подводных отложений. Компоненты твердых частиц в таких отложениях обычно имеют узкий размерный диапазон, как показано в таблице 14.4, что делает их особенно восприимчивыми к быстрому разжижению. Кроме того, коэффициент пустотности обычно превышает критический коэффициент пустотности. Относительно небольшие энергии, такие как механические шумы и вибрации, могут запустить процесс, и преобразование потенциальной энергии частиц с верхних частей склона в кинетическую энергию может сделать все остальное.

14.6. УГЛУБЛЕНИЕ ДНА И ВЫНУТЫЙ ГРУНТ

14.6.1. Общее обсуждение

Выкопанные речные и портовые материалы представляют проблему для многих прибрежных государств, поскольку они часто загрязнены тяжелыми металлами и органическими соединениями. Эти загрязнители являются результатом промышленных сбросов и ливневых стоков в прилегающие ручьи или реки. Инженерный корпус армии США в настоящее время поддерживает утилизацию загрязненных материалов на мелководном побережье океана в насыпях, которые могут быть покрыты чистым материалом. Задача такой шапки состоит в том, чтобы изолировать загрязненные отложения и предотвратить или контролировать выброс загрязненных межзельных вод. Согласно Chaney и Demars (1991), есть четыре фактора, связанные с геотехнологией, которые необходимо учитывать.

1. Прогнозирование начального радиального распространения дноуглубительных отложений, сбрасываемых в прибрежную зону.

2. Прогнозирование начальной конфигурации (высота, уклон, диаметр) осадочных насыпей. Стабильная конфигурация насыпного осадка сильно зависит от геотехнических свойств дноуглубительных отложений.

3. Проектирование насыпных шапок для тех мест, где они необходимы. Грунты, опасные для окружающей среды, должны быть закрыты. Геотехнические свойства шапки определяют ее уклон, сжимаемость и гидравлическую проводимость.

4. Прогнозирование разрушаемости грунта. При разрушении грунта, извлеченного при дноуглубительных работах, прочность на сдвиг осадка будет влиять на размер донных течений, которые необходимы для инициирования и продолжения переноса осадка.

Практика дноуглубительных работ была разработана для достижения не только максимально возможной экономической отдачи за счет максимизации производства, но и минимизации воздействия на окружающую среду. Пульпы стали более сложными и высоко инструментальными. Методы оценки и выбора альтернатив захоронения дноуглубительных материалов весьма прогрессивны. Достигнут также успех в развитии технологий долгосрочного планирования дноуглубительных работ и утилизации дноуглубительных материалов. Технология выемки грунта – непростая задача, так как требует знаний из других

дисциплин. Международное сотрудничество в этой области Японии, Нидерландов, Великобритании и других стран хорошо известно. В настоящее время большинство областей исследований сосредоточены на (1) тематических исследованиях, (2) методах управления и (3) выгодном использовании материала для выемки грунта.

Таблица 14.7. Основные причины нестабильности фундамента и структур прибрежных и морских сооружений.

Нагрузки

Искусственные нагрузки

Вибрация оборудования

Воздействие баржи

Экологические нагрузки

Вулканические нагрузки

Землетрясение

Лед

Волны и цунами

Постоянное течение

Ливневый дождь

Тайфуны (ураганы)

Замораживание–оттаивание, высыхание–намокание

Морские скважины

Морской перенос и другие движения масс

Загрязнение системы воздух–вода–почва

Коррозия

Ошибки при проектировании

Ошибки предполагаемой нагрузки

Неправильные методы проектирования

Строительные недостатки

Погодный эффект

Полевой контроль и надзор

Строительные проблемы в бетоне

Смешивание и размещение; жаркая и холодная погода

Перегрузка по форме; преждевременное удаление формы

Строительные проблемы в стали

Ручные и строительные трудности при длительной укладке

Проблемы соединения свай и шпунтов

Сварные или клепаные тройники

Условия движения

Сращивание листов от разных производителей

14.6.2. Тематические исследования и методы управления

Общие выводы, основанные на результатах тематических исследований: (1) удаление дноуглубительных материалов; Подходит ли место для размещения отходов? Проблемы с местоположением объекта обычно связаны с экологическими проблемами; (2) программы строительства закрытых хранилищ требуют широкой координации и сотрудничества между регулирующими органами, спонсорами проекта и местными группами интересов; (3) уменьшение доступной земли для закрытых хранилищ требует точных методов

прогнозирования, которые будут использоваться при выборе мест захоронения дноуглубительных материалов. Сайты должны удовлетворять долгосрочные потребности, а не только краткосрочные; (4) защита от эрозии от воздействия волн как внутри, так и снаружи крупных закрытых хранилищ является основным соображением при проектировании. Согласно исследованию Корпуса армии США (1984 г.) и Патину (1987 г.), методы управления включают (1) оценку переноса отложений, (2) транспортировку жидких растворов высокой плотности, (3) методы долгосрочного управления для районов захоронения, (4) модели управления, (5) оценка бентических ресурсов и (6) управление донными отложениями, содержащими токсичные вещества. Полезное использование дноуглубительных материалов также является важным вопросом, который необходимо учитывать. Некоторые методы повторного использования будут более подробно рассмотрены в разделе 17.10.

14.7. ЭРОЗИЯ ПОЧВЫ

14.7.1. Общее обсуждение

Эрозия почвы вызвана воздействием ветра, осадков или волн на поверхности оголенных или незащищенных поверхностей почвы. Она включает в себя как процесс отделения частиц грунта, так и их транспортировку. Осадки, которые могут образовываться в результате эрозии, ограничивают эффективность дренажных и ирригационных каналов, заполняют водохранилища, загрязняют поверхностные воды, наносят ущерб сельскохозяйственным угодьям, домам, дорогам и мостам, а также нарушают естественную экологию и окружающую среду. По оценкам Министерства сельского хозяйства США, общая стоимость ликвидации наносов и дноуглубительных работ в результате эрозии почвы составляет приблизительно 500 миллионов долларов в год. Ежегодно для удаления осадка из оросительных каналов требуется около 16 миллионов долларов. Эти цифры не учитывают ущерб сельскохозяйственным угодьям, домам, дорогам, мостам и зонам отдыха в результате потери почвы. Оценка скорости эрозии во всем мире, согласно сообщениям HRB (1973), дала следующие данные.

	10 ⁹ метрических тонн/год
Переносится по реке	
Содержание растворенных веществ в воде	2,7–3,9
Содержание твердых веществ в воде	8,3–58,0
Сочетание предыдущих пунктов	3,8–17,5
Перенос ветром с суши	0,06–0,36
Перенос ледником	0,1

14.7.2. Причины и механизмы эрозии

Причины эрозии почвы обычно делятся на две категории: воздействие воды и воздействие ветра. Основные механизмы эрозии в обоих случаях одинаковы. Явления эрозии происходят, когда вызванные водой или ветром сдвиговые напряжения на поверхности достигают значений, достаточно больших, чтобы вызвать удаление частиц с этой поверхности. Взаимодействие почвы и ветра и механизм ветровой эрозии будут обсуждаться в разделе 18.4. В этом разделе мы сфокусируемся на водной эрозии.

Механизм водной атаки на сухую связную почвенную систему обсуждался в разделе 5.7. Влияние дисперсных и флокулированных глинистых структур на равновесие почвы под проточной водой было изучено Liou (1970). Силы, действующие на глинистые частицы для обоих случаев, показаны на рисунке 14.7. Характеристики структурных единиц, показанных на рисунке 14.7, представлены в разделе 4.3. Подробные обсуждения причин и механизма когезионной эрозии почвы относятся к:

- 1) режиму эрозии;
- 2) открытой сетевой системе, образованной отложением осадка;
- 3) распределению поверхностных сил;
- 4) переориентации или перемещению частиц почвы.

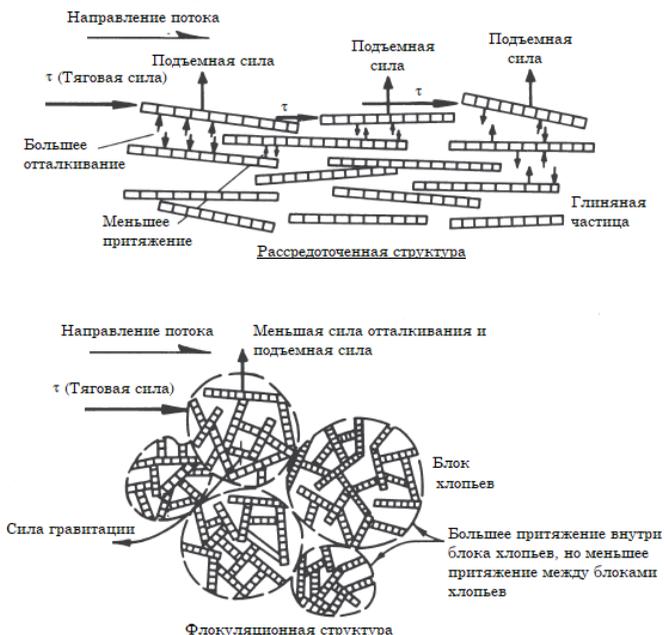


Рисунок 14.7. Влияние глинистых структур на равновесие почвы под проточной водой (по Liou, Y. D. [1970], Hydraulic erodibility of two pure clay systems, Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, CO).

Рисунок 14.8 иллюстрирует эти причины и механизмы. Применение химических и электрических параметров для предсказания разрушаемости выполнили Agulanandan и соавторы (1973) и Paaswell (1973). На основании лабораторных исследований было установлено, что как типы, так и концентрации ионов в порых и эродирующих жидкостях, а также типы глинистых минералов оказывают доминирующее влияние на эрозию почвы. Типы и количество глинистых минералов и структура почвы могут быть определены с помощью измерений электрической дисперсии. Тип и количество композиций пор и разрушающихся жидкостей могут быть определены с помощью SAR (раздел 5.6) и электропроводности (раздел 9.8).

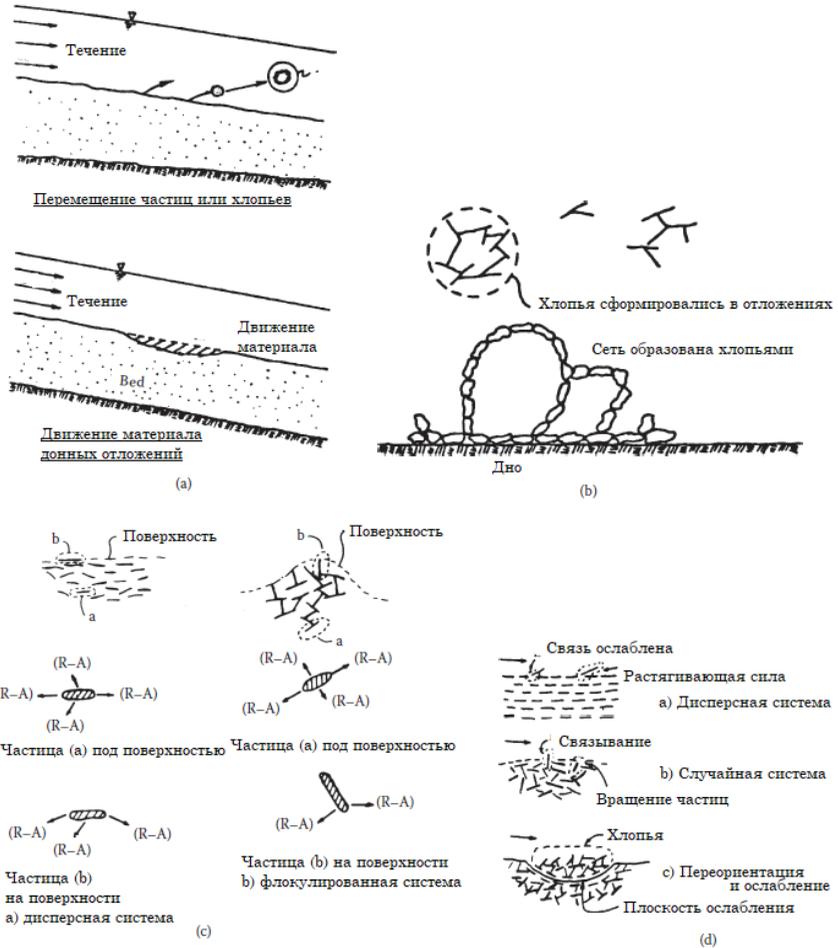


Рисунок 14.8. Причины и механизмы когезионной эрозии почвы: (а) режим эрозии; (б) открытая сетевая система, образованная осаждением хлопьев; (с) распределение поверхностных сил; (д) переориентация или перемещение частиц (по Paaswell, R. E. [1973],

Causes and mechanisms of cohesive soil erosion: The state of the art, HRB Special Report 135, pp. 52–74. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не подлежит защите авторских прав).

14.8. ВОДНАЯ ЭРОЗИЯ

14.8.1. Водная эрозия почвы

14.8.1.1. Оценка уравнения для расчета водной эрозии

Изучение оценки потерь почвы в результате водной эрозии началось в 1940 году. В 1958 году было разработано полуэмпирическое уравнение, которое Wischmeier и сотрудники Службы сельскохозяйственных исследований США называют универсальным уравнением потери почвы (USLE). USLE был разработан для сельскохозяйственных земель к востоку от Скалистых гор. Модифицированное уравнение, основанное на USLE для прогнозирования потери почвы из-за водной эрозии на участках строительства шоссе, предложили Israelsen и соавторы (1980a, b). В данном уравнении учитывались следующие параметры:

- 1) улучшенный индекс отношения осадков и эрозии;
- 2) метод оценки воздействия растений в условиях местного климата;
- 3) количественные факторы эрозии почвы;
- 4) метод учета влияния взаимосвязей таких переменных, как уровень производительности, севооборота и управление отложениями и остатками.

Модифицированный USLE для оценки потери почвы от водной эрозии:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot VM \quad (14.2)$$

где A – потери почвы на единицу площади, тонн/акр/год, R – коэффициенты осадков, LS – топографический коэффициент (длина и крутизна склона) и VM – коэффициент контроля эрозии.

14.8.1.2. Коэффициент увлажнения (R)

Коэффициент увлажнения (R) в уравнении 14.2 – это количество единиц индекса эрозии в течение нормального года. Индекс эрозии является мерой эрозионной силы определенного количества осадков и определяется для одного шторма следующим образом:

$$R = EI / 100 \quad (14.3)$$

где E – общая кинетическая энергия данного шторма, I – максимальная 30-минутная интенсивность осадков.

14.8.1.3. Коэффициент эрозии почвы (K)

Коэффициент эрозии почвы (K) в уравнении 14.2 имеет значение в диапазоне от 0,1 до 0,7 и представляет собой числовое представление способности почвы противостоять эрозионной энергии дождя. Разрушаемость почвы увеличивается, поскольку значение K становится больше.

14.8.1.4. Топографический коэффициент (LS)

Топографический коэффициент (LS) в уравнении 14.2 представляет собой числовое представление комбинации длины и крутизны, которая должна использоваться с коэффициентом осадков (R) и коэффициентом эрозии грунта (K) для оценки потенциала скорости эрозии для конкретного склона строительства. Уравнение, которое разработали Foster и Wischmeier (1973) и Wischmeier и Smith (1978), выглядит следующим образом:

$$LS = \left(\frac{l}{72.6}\right)^m \left(\frac{65.41S^2}{S^2+10.000} + \frac{4.6S}{\sqrt{S^2+10.000}} + 0.065\right) \quad (14.4)$$

где LS – топографический коэффициент, l – длина склона, футы, S – крутизна склона, %, m – показатель степени в зависимости от крутизны склона: 0,2 для наклона < 1 %, 0,3 для наклона от 1 % до 3 %, 0,4 для наклона от 3,5 до 4,5 % и 0,5 для наклона > 5 %.

14.8.1.5. Коэффициент контроля эрозии (VM)

Коэффициент контроля эрозии (VM) в уравнении 14.2 представляет собой единое целое и учитывает меры контроля эрозии, будь то вегетативные, механические, манипуляции с поверхностью почвы, химическая обработка и т. д. Он не относится к таким структурам, как уступы и канавы. Типичные значения факторов из результатов исследований, представленных Israelsen и соавторами (1980b), перечислены ниже.

Условие	Диапазоны VM-фактора
Уплотненная насыпь	1,24–1,71
Асфальтовая эмульсия на голой почве	0,01–0,70
Пыльник	0,29–1,05
Посевы	0,01–0,40
Мульча	0,01

Как обсуждалось в предыдущем разделе, явления эрозии почвы являются сложными. Все уравнения, такие как уравнения 14.1 и 14.2, являются полумпирическими формулами. Эти уравнения полезны в качестве руководства для предварительных исследований потери почвы в результате водной эрозии.

14.8.2. Факторы, влияющие на водную эрозию



Зона 1 и 2 включает в себя почти все образцы глины с плотин, которые были повреждены в Оклахоме и Миссисипи. Образцы, как правило, имеют высокую дисперсию при испытании в лаборатории, это сильно разрушающиеся глины.

Зона 1 включает в себя все образцы из 16 глиняных плотин, которые были повреждены в результате эрозии туннеля от осадков в Венесуэле, Оклахоме, Миссисипи, Арканзасе, Теннесси и Техасе.

Зона 3 включает результаты испытаний для большинства «контрольных» образцов, это вероятный диапазон обычных эрозионно-стойких глин.

Зона 4 является переходной зоной, большинство образцов в этой зоне имели низкую дисперсию при испытаниях в лаборатории. Нижняя граница зоны не очень хорошо установлена.

Рисунок 14.9. Корреляция между результатами химических испытаний вытяжки грунтовых вод и эксплуатационными характеристиками земляных плотин (по Sherard, J. L. et al. [1972], Proc. Specialty Conf. on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, ASCE, NY, v. 1, part 1, pp. 589–626).

Помимо скорости потока, химический состав воды является основным контролирующим фактором, влияющим на водную эрозию. На рисунке 14.9 представлена корреляция между химическими испытаниями почвы на извлечение поровой воды из почвы и эксплуатационными характеристиками земляных плотин. Зоны 1 и 2 классифицируются как сильно разрушаемые глины. Зона 3 является устойчивой к эрозии глины, а зона 4 является переходной зоной. Большинство образцов в этой зоне имели низкую дисперсию при испытаниях в лаборатории. Нижняя граница зоны не очень хорошо установлена. Процент натрия на рисунке 14.9 рассчитывается так, как показано на рисунке 14.10.

$$\text{Процент натрия} = \frac{\text{Na}}{\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K}} \cdot 100 \quad (14.5)$$

Для почв с низким содержанием калия процентное содержание натрия напрямую связано с коэффициентом адсорбции натрия (SAR) и общим количеством растворимых солей, как показано на рисунке 14.10. Термин SAR предложил Richards (1954). Данный показатель может быть вычислен из следующего уравнения:

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}}{0.5 (\text{Ca} + \text{Mg})} \quad (14.6)$$

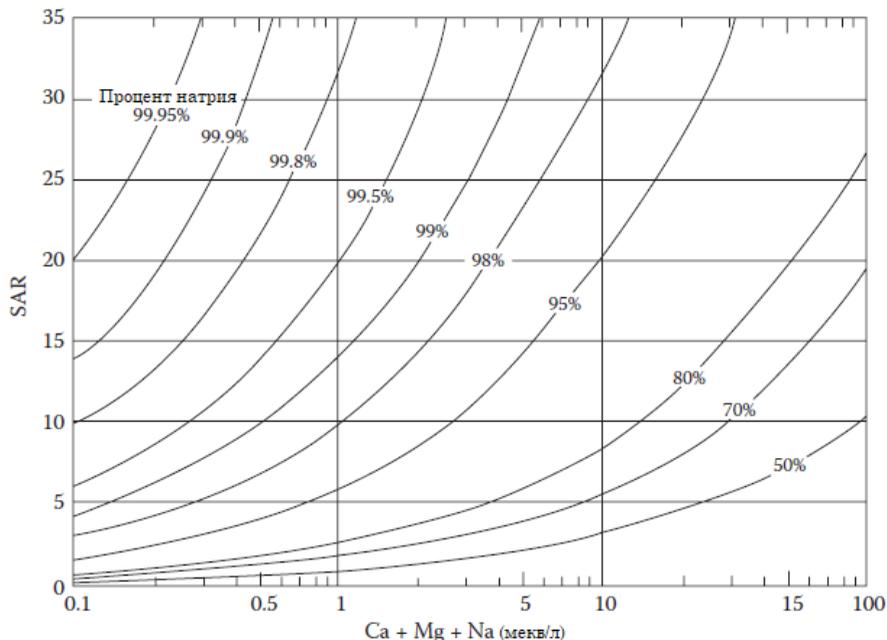


Рисунок 14.10. Процент натрия в зависимости от SAR и общего количества растворимых солей в почве с низким содержанием калия (по Sherard, J. L. et al. [1972], Proc. Specialty Conf. on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, ASCE, NY, v. 1, part 1, pp. 589–626; Perry, E. B. [1975], Piping in earth dams constructed of dispersive clay: Literature review and design of laboratory tests, Waterway Experiment Station Technical Report S-75-15, 105 p. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не подлежит обсуждению. на защиту авторских прав).

Рисунок 14.11, связывающий индекс пластичности почвы с произведением глубины и наклона канала для проектирования дренажных каналов, сделал Smerdon (1967), который ориентировался на данные Пергу (1975). Эта диаграмма также показывает относительную эрозийность почвы.

14.9. ВЕТРОВАЯ ЭРОЗИЯ

14.9.1. Ветровая эрозия почвы

14.9.1.1. Оценка ветровой эрозии

Потенциал ветровой эрозии можно оценить способом, аналогичным способу для воды, используя уравнение потери почвы (уравнение 14.2). Уравнение ветровой эрозии для оценки потерь почвы из-за ветра на участках строительства автодорог, представленное здесь, основано на работе Chepil (1945):

$$E' = I' \cdot C' \cdot K' \cdot V' \cdot L' \quad (14.7)$$

где E' – потери почвы из-за действия ветра, тонны/акры/год, I' – коэффициент эрозии ветровой поверхности почвы, C' – климатический фактор локальной ветровой эрозии, K' – коэффициент шероховатости поверхности почвы, V' – вегетативный фактор и L' – длина неэкранированного расстояния, параллельного ветру, в направлении ветра.

14.9.1.2. Фактор ветровой эрозии почвы (I')

Методы для определения различных параметров, используемых в уравнении 14.5, представлены ниже.

$$I' = I \cdot \text{тонны/акры/годы} \quad (14.8)$$

где I – индекс эрозии почвы, а I_s – коэффициент эрозии. Индекс эрозии почвы из-за действия ветра (I) представляет собой потенциальную потерю почвы в тоннах/акры/годы из-за широких незащищенных, изолированных, голых и гладких грунтов. Значение I_s определяется в условиях *in situ* путем сухого просеивания образца почвы через сито № 20 (сито с отверстием 0,84 мм). Зная процентное содержание частиц, не проходящих через сито № 20, можно получить тонны на акр. Всякий раз, когда склон обращен к доминирующему направлению ветра, так что ветер падает на склон, эрозия ускоряется. Это ускорение известно как эффект бугорка против потока ветра, и коэффициент эрозионной способности бугорка I_s используется для корректировки индекса эродруемости почвы I для этого воздействия.

14.9.1.3. Климатический фактор локальной ветровой эрозии (C')

C' – это кубическая величина средней скорости ветра для каждого месяца, деленная на квадрат годового индекса эффективности осадков (PE), который разработал Thornthwaite (1931):

$$C' = 34,483 V^3 / (PE)^2 \quad (14.9)$$

где C' – коэффициент ветровой эрозии, V – среднемесячная скорость ветра на высоте 30 футов для всех ветров, скорость которых превышает 12 миль в час, PE = индексу PE = индексу эффективности осадков Торнтуэйта = $115 (P/T - 10)^{1,111}$, P – среднегодовое количество осадков, а T – среднегодовая температура.

14.9.1.4. Другие факторы

Другие факторы, перечисленные в уравнении 14.5, такие как K' , V' и L' , могут быть определены с помощью графических процедур, разработанных Israelsen и

соавторами (1980b). Численные примеры на каждый случай также предоставляются. Краткое обсуждение характеристик каждого параметра представлено ниже.

14.9.1.4.1. Коэффициент шероховатости поверхности почвы (K')

Коэффициент шероховатости поверхности (K'), является мерой естественной или искусственной шероховатости поверхности почвы в виде гребней или небольших волн. Его можно определить, зная высоту отдельных элементов шероховатости.

14.9.1.4.2. Вегетативный коэффициент (V')

Коэффициент V' представляет эквивалентные килограммы растительного вещества в качестве элемента шероховатости. Значение V' получают влажным просеиванием высушенной на воздухе почвы, чтобы отделить органическое вещество от минеральной части. Органическое вещество затем сушат и взвешивают. Вес в тысячах фунтов на акр вводится графической процедурой.

14.9.1.4.3. Расстояние неэкранированного ветра (L')

Расстояние неэкранированного ветра L' определяется как расстояние, параллельное преобладающему направлению ветра, превышающему экранированное расстояние. В полевых условиях преобладающее направление определяется компасом, а затем расстояние в незащищенной области, превышающее высоту любых барьеров в десять раз, записывается в футах как L' .

14.10. ЭРОЗИОННЫЙ КОНТРОЛЬ В СТРОИТЕЛЬНЫХ ЗОНАХ

Строительство автомагистрали вызывает много проблем в местах, близких к рекам и ручьям. Хотя некоторые методы, такие как создание дренажных канав и укрытий, террасирование, обработка контуров, постройка заборов, стабилизация почвы, укладка соломы, сена или искусственного газона, использовались во время строительства как для контроля водной, так и ветровой эрозии, обычная стабилизация почвы обычно носит постоянный характер. Поскольку строительство и техническое обслуживание являются временными, обычные методы стабилизации могут не подходить. Новые материалы и/или методы доступны для временной стабилизации поверхности почвы, чтобы минимизировать эрозию почвы от воды и ветра во время строительства или технического обслуживания.

Существует ряд структурных мер, которые могут иметь место либо как временные, либо как постоянные установки. Эти методы включают (1) отвод, (2) травяные или асфальтированные водные пути, (3) заглубленные выходы труб, (4) настольные террасы или уступы, (5) удерживающие конструкции, (6) способствующие стабилизации почвы и т. д. В таблице 14.8 приведены некоторые методы для предотвращения или контроля эрозии почвы.

14.11. РЕЗЮМЕ

1. Водно-болотные угодья, поймы, прибрежные окраины, дноуглубительные работы и эрозия являются частью актуальных экологических и эколого-геологических проблем. Такие районы исключительно чувствительны к изменениям окружающей среды и особенно подвержены необратимым экологическим нарушениям.

2. В дополнение к этим экологическим проблемам, указанным в пункте 1, также обсуждаются другие темы, такие как вторжение соленой воды, лиманы и парниковые эффекты.

3. Зонирование или микрорайонирование геоэкологических и климатологических условий является основным фактором, влияющим на устойчивость морских сооружений. Необходимо изучить эти условия, прежде чем можно будет приступить к окончательному проектированию и строительству конструкций.

4. Эрозия почвы вызвана воздействием ветра, осадков или волн на оголенные или незащищенные поверхности почвы. Рассматриваются причины и механизмы эрозии для различных действий. Представлены методы оценки водной и ветровой эрозии. Обобщена технология борьбы с эрозией на строительных площадках.

Таблица 14.8. Методы предотвращения и контроля эрозии почвы во время строительства автомобильных дорог.

Контроль водной эрозии
Защита поверхности
Растительность
Отсыпь
Стоги из сена
Покрытия
Защитные пленки
Защитные мульчи
Мощение
Стабилизация почвы
Уменьшение потока воды
Ограды
Дерн
Соломенные массы
Фильтры
Шероховатые поверхности
Контурное культивирование
Преграды
Отводы воды
Дамбы
Дренажные канавы
Дренажные трубы
Изменения русла канала
Отстойники
Контроль ветровой эрозии
Обработка почвы
Ветровые полосы
Дюны
Заборы
Стабилизаторы поверхности почвы
Растительность

ПРОБЛЕМАТИКА

14.1. Обсудите объекты, чувствительные к экологии и экогеологии. Что это за объекты?

14.2. Обсудите устьевое явление. Почему это важная часть экосистем Земли?

14.3. Определите парниковый эффект и то, как этот эффект повлияет на геотехнические проблемы окружающей среды.

14.4. Почему проникновение соленой воды вызывает загрязнение грунтовых вод?

14.5. Почему большинство пляжных песков распределены равномерно?

14.6. Земляная плотина должна быть построена методом гидравлического заполнения. Единица массы почвы и воды, выходящих за линию разгрузки при углублении дна, составляет 84,0 pcf. В своем естественном состоянии почва оказывается только частично насыщенной с сухой единицей массы = 102,0 pcf и удельным весом твердых веществ, $G_s = 2,72$. Сколько кубических футов накачки потребуется для каждого кубического фута выкопанного грунта?

14.7. Почва выкапывается со дна реки с целью его углубления. Установлено, что в естественном состоянии почва имеет сухой вес единицы, равный 102,0 pcf, удельный вес твердых веществ, равный 2,72, и степень насыщения, равную 98 %. Единица массы смеси почвы и воды, выходящих за линию разгрузки при углублении дна, составляет 84,0 pcf. Если эта линия разряжается со скоростью 100 галлонов в минуту, сколько потребуется времени, чтобы выкопать 50 000 кубических ярдов со дна реки?

14.8. Обсудите полезное использование дноуглубительных материалов и управление донными отложениями, содержащими токсичные вещества.

14.9. Обсудите механизм эрозии почвы, вызванной загрязненной водой.

14.10. Обсудите механизм взаимодействия нефти и воды.

14.11. Канал и река протекают параллельно в среднем на расстоянии 200 м друг от друга. Песчаная толща между слоями непроницаемой глины пересекает и реку, и канал ниже уровня воды. Высота воды в канале составляет 620 м, а в реке – 600 м. Песчаный пласт имеет толщину 5 м и проницаемость (*in situ*) 0,120 м/мин. Рассчитать потери просачивания из канала в кубических метрах в секунду на километр.

15. Оседание поверхности земли

15.1. ВВЕДЕНИЕ

Оседание поверхности земли – извечная проблема. Она существовала всегда, но до последних лет оставалась незамеченной из-за роста населения и повышения уровня жизни, как обсуждалось в разделе 1.2, по мере освоения новых малопродуктивных земель. Оседание охватывает большие площади, подверженные подземной добыче, выкачке подземных вод, нефти и природного газа, а также наводнениям, подземным пожарам, действию корней деревьев и строительных работ и проникновению загрязнений. Термин «оседание» впервые использовал в геологии в 1853 году Charles Lyell. Американский геологический институт (Gary и соавторы, 1972) описывает оседание как (1) локальное массовое движение, которое включает в себя главным образом постепенное оседание или опускание поверхности твердой земли с небольшим или нулевым горизонтальным движением, оно не происходит вдоль свободной поверхности; (2) опускание значительной части земной коры из-за тектонических движений.

Британская энциклопедия (1974) определяет оседание как «погружение земной поверхности в ответ на геологические или антропогенные причины». Venson (1978) предложил термин под названием «локализованное погружение». Локальное погружение связано с полостями или трубопроводами в растворимых породах и неуплотненных материалах. В начале 1970-х годов большинство исследований было сосредоточено на геомеханическом оседании земли, а также на гидрологии, геотехнологии и геологии. Однако в последнее время в поле научного интереса попали геохимия, физическая химия, а также геотермальные и бактериальные воздействия на почвенно-водные системы. Кроме того, ученые обсуждают оседание в опасных или токсичных областях. Рассмотрение особенностей оседания, включая механизмы и процедуры анализа, дал Scott (1978). Обзор методов, использованных при исследовании оседания, дал Saxena (1978).

15.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ И КЛАССИФИКАЦИИ ЗЕМЕЛЬНОЙ СУБСИДЕНЦИИ

15.2.1. Характеристики оседания земли

Когда нагрузка приложена к почвенной массе, деформация может возникнуть в результате (1) немедленной упругой и неупругой деформации структуры почвы, (2) действия поровой воды, сливаемой из массы почвы, (3) действия непрерывного зависящего от времени или вязкого потока под воздействием напряжения сдвига, что приводит к переориентации почвенных частиц, и (4) сочетания всего вышеперечисленного, так как в большинстве случаев все эти процессы происходят одновременно. Однако это будет зависеть от свойств почвы, состояния дренажа, истории напряжений и факторов окружающей среды. Случай 2 обычно называется консолидацией (раздел 11.5), случай 3 – ползучестью (раздел 11.7), а случай 4 – проседанием. В широком смысле этого слова *просадка* может быть определена как деформация или оседание грунтовой массы в любом направлении, вызванное различными внешними нагрузками, внутренним

напряжением и неуравновешенными факторами окружающей среды. Если использовать нетехнический термин, то можно говорить просто о движении земли. Существует несколько систем классификации для оседания грунта. Некоторые из этих классификаций представлены далее.

15.2.2. Классификация оседания грунта

15.2.2.1. Геотехническая инженерная классификация

С геотехнической точки зрения, просадка может быть классифицирована на основании ее происхождения, механизма деформационной нагрузки, появления поверхностного движения и скорости движения частиц грунта. Кроме того, некоторые оседания являются естественными, а некоторые – искусственными. Предложена геотехническая классификация оседания, как показано в таблице 15.1.

Таблица 15.1. Геотехническая классификация оседания.

На основе происхождения		
Искусственные	Природные	
Удаление жидкости (вода, газ, нефть)	Землетрясения	
Ведение горных работ	Наводнения	
Глубокие раскопки, траншеи, карьеры	Корни, флора и фауна	
Строительные работы (забивка свай, уплотнение)	Поверхностная и подповерхностная эрозия	
Вибрация (взрыв, движение техники)	Воронки в известняке	
	Тектоническая активность	
	Вечная мерзлота	
На основе механизма нагрузки–деформации		
Несбалансированные нагрузки	Внешняя нагрузка	Колебания порового флюида или температуры
Загрузка шахты	Воздействие жидкости	Удаление флюидов
Карьер и ямы	Землетрясения	Геотермальные факторы
Глубокие выемки, траншеи	Вибрации	Усадка и набухание
Туннели	Взрывы	Намокание–высыхание
Известняковые воронки	Наводнения	Замораживание–оттаивание
Тектонические движения		
На основе появления поверхностного движения		
Происходит медленное проседание	Происходит быстрое проседание	
Удаление жидкости	Заброшенные места добычи	
Наводнения	Глубокие раскопки, траншеи, карьеры и резервные выемки	
Тектоническая активность	Известняковые воронки	
Геотермальные факторы	Туннели	
На основе скорости движения частиц почвы¹		
Тип оседания	Скорость (м/год)	
Чрезвычайно быстро	0,6–1,0	
Очень быстро	0,4–0,6	
Быстро	0,2–0,4	
Умеренно	0,08–0,2	
Медленно	0,006–0,08	
Очень медленно	0,0004–0,006	

¹ Приведенная выше классификация представлена лишь для того, чтобы дать общее представление. Если есть вертикальное опускание, данные о нем могут приводиться как расчетный анализ. Если на крутом склоне скорость частиц больше 0,06 м/год или угол наклона обратной засыпки больше угла внутреннего трения (f), это может вызвать оползень; если скорость частицы больше 3 м/с, процесс будет классифицирован как землетрясение. Если вертикальное оседание неравномерно, это может привести к проблеме дифференциального урегулирования.

Источник: по Fang, H. Y. and Cleary, T. [1976], Analysis and Design of Building Foundations, Enviro Publishing, Bethlehem, PA, pp. 467–518. Перепечатано с разрешения Enviro Publishing.

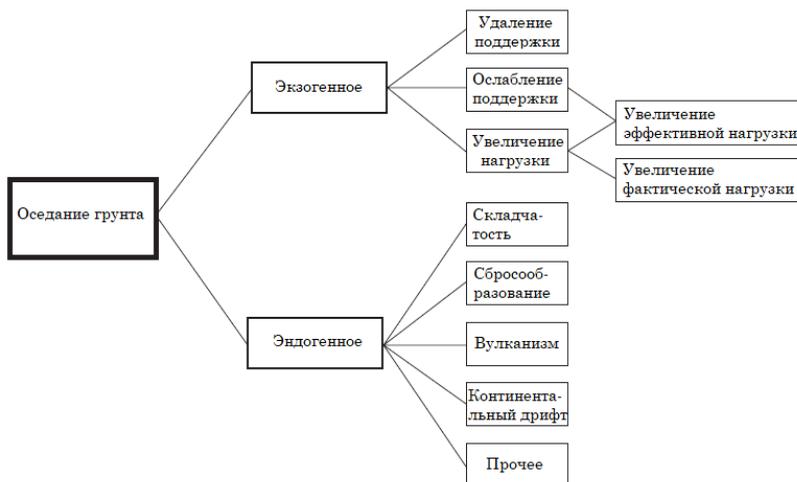


Рисунок 15.1. Генетическая классификация оседания земель (по Prokovich, N. P. [1978], Evaluation and prediction of subsidence, ASCE, New York, pp. 389–399).

15.2.2.2. Генетическая классификация

Prokovich (1978) предложил генетические подходы для оседания земли, как показано на рисунке 15.1. В широком генетическом смысле оседание можно разделить на две основные группы – эндогенные и экзогенные. Краткое описание каждой группы представлено ниже.

15.2.2.2.1. Эндогенное оседание

Эндогенное оседание связано с процессами, которые в основном происходят внутри планеты. Такое оседание может быть дополнительно подразделено на основе причинных процессов, связанных с образованием складок и разломов, вулканизмом, дрейфом континентов и т. д.

15.2.2.2.2. Экзогенное оседание

Экзогенное оседание связано с процессами, которые происходят вблизи земной поверхности, включая деятельность человека. Экзогенные процессы

поддерживаются вземной энергией, особенно солнечной. Экзогенное оседание – это в основном поверхностное выражение уплотнения отложений на глубине вследствие естественных или техногенных процессов. У него есть две причины:

1) оседание, связанное с удалением прочной опоры, например, оседание вследствие добычи, карста и т. д.;

2) оседание, связанное с увеличением нагрузки на уплотняющие пласты из-за забора воды, нефти, газа и др.

Приводится несколько типичных примеров экзо- и эндогенных процессов.

15.3. МЕХАНИЗМЫ И ЯВЛЕНИЕ ОСЕДАНИЯ ГРУНТА

15.3.1. Ползучесть и прогрессирующие разрушения

Некоторое движение в виде ползучести происходит практически во всех местах, где проседает грунт. Скорость этих движений, которые часто ограничиваются поверхностью, меняется в течение года. Скорость увеличивается по мере приближения стадии разрушения, и фактическое время проседания часто можно предсказать, отслеживая движения грунта. Сезонная ползучесть или оседание поверхности вызваны колебаниями температуры и влажности, а также жизненными циклами растительности и насекомыми или червями, перемещающимися внутри почвенной массы. Глубина поверхностного слоя, на которую влияет сезонное движение частиц почвы, часто равна глубине сезонных колебаний температуры и влажности или меньше ее. В умеренном климате сезонная ползучесть обусловлена прежде всего замерзанием и оттаиванием. Весной возникает высокое давление в поровой воде, снижая прочность на сдвиг и вызывая движение почвы. Оседание на ранней стадии может быть очень небольшим, но может привести к провалу, если скорость увеличивается. Непрерывное опускание вызвано гравитационными силами, и строительные нагрузки возникают ниже зоны поверхности сезонных колебаний. В сланцах (раздел 13.2) это происходит в относительно толстых зонах.

15.3.2. Явления, связанные с оседанием

Оседание на ранней стадии может быть очень небольшим, но тем не менее может привести к провалу, если увеличивается скорость. Существует связь между временем разрыва и скоростью деформации. Было обнаружено, что время разрыва обратно пропорционально скорости деформации и не зависит от типа почвы. К явлениям, связанным с оседанием, относятся поверхностные трещины, прогрессирующая эрозия, оседание грунта и т. д. Некоторые из этих явлений аналогичны оползням, как описано в разделах 16.2 и 16.3 и проиллюстрировано на рисунке 16.2.

15.4. ОСНОВНЫЕ ЕСТЕСТВЕННЫЕ ПРИЧИНЫ ОСЕДАНИЯ ГРУНТА

15.4.1. Тектоническое движение и землетрясения

Тектонические движения включают тектоническую ползучесть и тектоническое землетрясение. Тектоническая ползучесть – это кажущееся непрерывное смещение вдоль разлома с медленной, но изменяющейся скоростью, обычно не сопровождаемой наблюдаемыми землетрясениями. Тектонические землетрясения связаны с разломами или другими структурными процессами. Тектонические движения в земной коре представляют собой оседание, которое требует особой осторожности. Геологически активные разломы должны постоянно отслеживаться для определения скорости движения, чтобы компенсировать любое будущее смещение в структуре конструкции или фундамента. Одним из наиболее интенсивно изучаемых разломов является разлом Сан-Андреас в Калифорнии, который движется со скоростью около 5 см/год (Legget, 1973). Во время землетрясения 1906 года в Сан-Франциско смещение грунта вдоль разлома Сан-Андреас составило 6 м, как сообщает Seed (1991).

Оседание может быть вызвано землетрясениями и вибрациями. Если скорость циклического нагружения больше, чем время, необходимое для рассеивания поровой воды, то будет происходить непрерывное наращивание остаточного давления поровой воды после каждого цикла. Затем происходит оседание в виде разжижения, когда давление накопленной поровой воды становится больше, чем общее давление вскрыши на почву. Это приводит к разрушению структуры, при которой частицы почвы теряют контакт друг с другом, и почва ведет себя как тяжелая жидкость. Существует определенная потеря прочности на сдвиг, которая вызовет большие проблемы с оседанием и несущей способностью, а также может вызвать оползень. На рисунке 15.2 показано оседание грунта под землей, вызванное землетрясением в центре города Гватемала в результате землетрясения в 1976 году.

Оседание вызвано естественным и/или искусственным путем. В большинстве случаев актуально и то, и другое. Причинами являются геотермальные процессы, циклы замерзания–оттаивания и подземные трубопроводы. Удаление пара, как сообщается, является причиной оседания (Poland and Davis, 1969). Обсуждается влияние температуры на прочность на сдвиг, изменение объема и оседание окружающих почв (раздел 8.7). Циклы замерзания–оттаивания приведут к снижению прочности почвы. Подповерхностный трубопровод или подповерхностная эрозия – это горизонтальный поток подземных вод в подземную трещину или полость, которая может вызывать прогрессирующую эрозию мелкозернистых частиц почвы или отвод труб от трещины под потоком просачивания. В связных почвах эта эрозия может создать обширный туннельный эффект, при котором связные слои поддерживают остаток массы почвы через отверстие трещины. Закрытие этой полости из-за увеличения напряжения или постепенной потери прочности приведет к быстрому оседанию поверхности земли.

Тгаughber и соавторы сообщили о различном оседании мелиорированного торфа в болотистой местности в столичном Новом Орлеане (1978). Движение соли после захоронения ядерных отходов исследовали Dawson и Tillerson (1978). Термомеханические оседания, связанные с подземной газификацией угля, описали Shoemaker и соавторы (1978). Многие другие причины, такие как корни деревьев, насекомые и животные, дополнительно обсуждаются далее.



Рисунок 15.2. На фотографии показана просадка грунта на нижнем ярусе в результате землетрясения в Гватемале в 1976 году.

15.4.2. Флора и фауна почвы

Почва, как правило, подвержена коррозионной способности углекислого газа, образующегося при дыхании и брожении, а также действию кислот, возникающих при разложении растительности, и ферментов, выделяемых микроорганизмами (раздел 5.9). Почва в том виде, в каком она у нас есть сегодня, является совокупным результатом такого длительного воздействия в сочетании с физическим воздействием процессов влажного и сухого замораживания и оттаивания. Организмы разных размеров превратили поверхностный слой почвы из совокупности минеральных частиц в массу, кишашую организмами, и субстанцию с видимыми каналами, образованными корнями растений или прорытыми животными и насекомыми (Thom и Smith, 1938; Stevenson, 1982). Между частицами почвы есть также невидимые каналы и пространства различных размеров, запутанные сети микроскопических каналов, поверхности которых покрыты коллоидной слизью, и водные растворы переменной концентрации, содержащие минеральные и органические материалы.

Процесс разложения сложен, потому что почва содержит различные виды бактерий и организмов, такие как азотобактер, актиномицеты, грибы, микориза, простейшие, миксомицеты, черви и роющие животные. Эти факторы являются причинами проседания, потому что они могут инициировать подповерхностные

трещины, которые затем распространяются из-за роста корней, а чаще всего – проникновения воды. Проливные дожди или тающий снег могут проникать в подземные трещины, вызывая повышение давления в поровой воде, в результате чего снижается прочность на сдвиг и наблюдается дальнейший рост трещин для снятия избыточного порового давления.

Движение поверхности земли, вызванное корнями деревьев, является обычным явлением. Это можно наблюдать вокруг тротуара, патио и детской площадки. Vozozuk и Burn (1960) измерили движение поверхности земли, вызванное корнями деревьев, как показано на рисунке 15.3; данные указывают на то, что движение поверхности земли связано с расстоянием от дерева и высотой дерева. Корни деревьев, вызывающие движение земли, также приводят к подъему поверхности земли, о чем сообщают Samuels и Cheney (1975) и Grey и Leiser (1982).

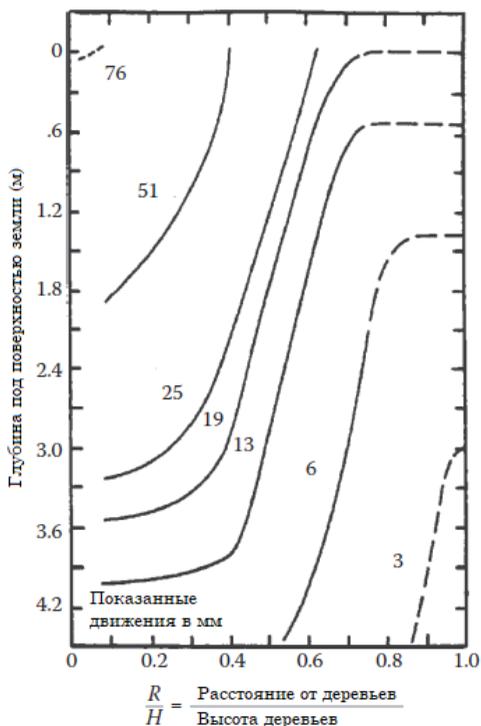


Рисунок 15.3. Движение поверхности земли вызвано корнями деревьев (по Vozozuk, M. and Burn, K. N. [1960], *Geotechnique*, v. 10, n. 1, pp. 19–32).

Тематическое исследование описывает коттедж в Виндзоре, построенный на лондонской глине. Наблюдения показывают, что здание подверглось воздействию долговременного характера из-за постепенного набухания глины после удаления деревьев во время расчистки территории. Указано, что здание было затронуто движением грунта; это обсуждается с точки зрения угловой деформации.

15.4.3. Наводнения или ливни

Оседание, вызванное наводнением, основано на воздействии изменений содержания воды на почвенно-водную систему. Это вызывает озабоченность как в отношении частично насыщенных, так и насыщенных почв. Если такая система подвержена затоплению, дополнительный вес паводковой воды увеличит общее давление вскрыши и вызовет как консолидацию, так и переориентацию частиц почвы. В частично насыщенных почвах, где воздушные карманы ранее препятствовали более плотной усадке, произойдет дополнительное оседание, если эти воздушные карманы исчезнут во время осушения. Подобно эффектам обезвоживания, скорость оседания напрямую связана со скоростью осушения, которое происходит, когда система возвращается в состояние статического равновесия. Если паводковая вода загрязнена, влияние поровых флюидов на поведение почвы значительно изменится, как обсуждалось в главах 5 и 6. Следовательно, оседание поверхности земли также значительно возрастет. Оседание также может происходить в случаях, когда изменения объема не являются результатом внешних нагрузок. Усадка и набухание вызваны изменениями как содержания воды, так и внутренних напряжений, на которые влияют такие процессы, как намокание–высыхание, замерзание–оттаивание, сезонное влияние колебаний грунтовых вод или обезвоживание во время строительства. Усадка возникает из-за капиллярного напряжения, которое образуется при высыхании насыщенной почвы. Набухание может происходить в почвах, когда влага может увеличиваться в объеме; это вызвано такими факторами, как осмотическое притяжение глинистых минералов к воде и электрическое отталкивание частиц глины и их положительно заряженных диффузно-двойных слоев друг от друга. В случаях, когда вскрыша была удалена, набухание может произойти из-за упругого отскока зерен почвы и из-за расширения воздуха, захваченного пустотами почвы. Оседание грунта из-за усадки может быть рассчитано на основе основных констант почвы, таких как предел усадки (SL), естественная влажность и удельный вес твердых веществ почвы. Типичный пример представлен ниже.

Пример 15.1

Для данной почвы естественная влажность составляет 50 %. Лабораторные испытания показывают, что предел усадки (SL) почвы составляет 35 %, а удельный вес твердых веществ составляет 2,70. Определите величину оседания (вертикальное оседание) или изменения объема, когда естественное содержание воды снижается до предела усадки.

Решение

Основываясь на соотношении твердое тело – вода – воздух, можно сделать расчет по формуле $S = \omega G_s/e$, где S – степень насыщения (в этой задаче предполагается 100 %), ω – естественная влажность = 50 %, $G_s = 2,70$, e – отношение пустот в естественное состояние.

В естественном состоянии: $e = \omega G_s = (0,50) (2,70) = 1,35$

В условиях усадки: $e = (0,35) (2,70) = 0,945$

Изменения отношения пустот (e) от естественного состояния к усадке:

$$e = 1,35 - 0,945 = 0,405$$

Из базовой геотехники изменение объема, связанное с изменением соотношения пустот:

$$\Delta V = V e / 1 + e = (1) (0,405) / (1 + 1,35) = 0,172 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Изменение объема на единицу объема почвы составляет $0,172 \text{ м}^3/\text{м}^3$, что является максимумом, который можно ожидать в результате усадки для элемента данной почвы первоначально при содержании влаги 50 %.

15.5. ОБЕЗВОЖИВАНИЕ

15.5.1. Явление обезвоживания и его механизм

За последние несколько десятилетий оседание воды из-за обезвоживания было общей проблемой в разных частях света. В районах, где количество доступной пресной поверхностной воды ограничено или где есть необходимость в удовлетворении растущих промышленных и муниципальных потребностей, единственное оставшееся решение заключается в выкачке воды из водоносных горизонтов. В местах, где уровень грунтовых вод был понижен в сильно сжимаемых донных отложениях, на поверхности земли могут образовываться усадочные трещины; из-за испарения через эти начальные трещины воды могут проникать глубже в землю. Например, Zeevaert (1972) сообщил, что в Мехико наблюдалось 15-метровое оседания грунта. На рисунке 15.4 представлен профиль оседания земной поверхности города Хьюстона из-за обезвоживания, о котором сообщил Marshall (1973). На рисунке 15.4 отражено оседание в регионе Хьюстона, которое продолжается все более быстрыми темпами и достигло 8 футов в районе парка Пасадена-Дир. Местоположение и количество оседаний напрямую связаны со снижением уровня грунтовых вод в результате забора воды из скважин. Ожидается, что к 2020 году общее погружение достигнет 9 футов в районе парка Пасадена-Дир.

Эффекты усадки с точки зрения отрицательного трения поверхностей, вызванного обезвоживанием, также являются проблемой при рассмотрении глубоких фундаментов. В случае висячей сваи усадка пронизанного слоя в сторону от сваи снижает адгезию сваи и грунта и, в свою очередь, приводит к снижению вместимости сваи и возможным разным осадкам. Для свай с концевыми опорами ограничивающий слой обеспечивает боковую поддержку в той мере, в которой предотвращается коробление сваи и образование усталостных трещин. Если произойдет усадка этого слоя вдали от сваи, отсутствие боковой поддержки может привести к изгибу сваи с соответствующим повреждением надстройки. К явлениям деформации поверхности земли при обезвоживании относятся следующие явления.

1. *Вертикальное смещение.* Абсолютное вертикальное оседание редко приводит к прямому повреждению, если все точки конструкции перемещаются на одну и ту же величину в одном и том же направлении, поскольку никакие

напряжения не будут перенесены на конструкцию (в отличие от дифференциальных расчетов, где большие напряжения индуцируются в каркас здания). Проблемы возникают в тех случаях, когда зазор между мостами уменьшается, лестницы располагаются ниже уровня пола, здания располагаются ниже уровня улицы и т. д.

2. *Горизонтальное смещение.* Как и вертикальные смещения, равномерное горизонтальное перемещение конструкции практически не вызывает повреждений. Дифференциальное смещение в форме горизонтальной кривизны является более серьезным, поскольку может произойти искажение горизонтального выравнивания.

3. *Уклоны.* Уклон желоба погружения может изменить уклоны дорог, железнодорожных путей и газопровода и водопровода. Это вызывает наклон, который может быть критичен для высоких зданий и помещений, где механизмы необходимо держать вертикально или горизонтально.

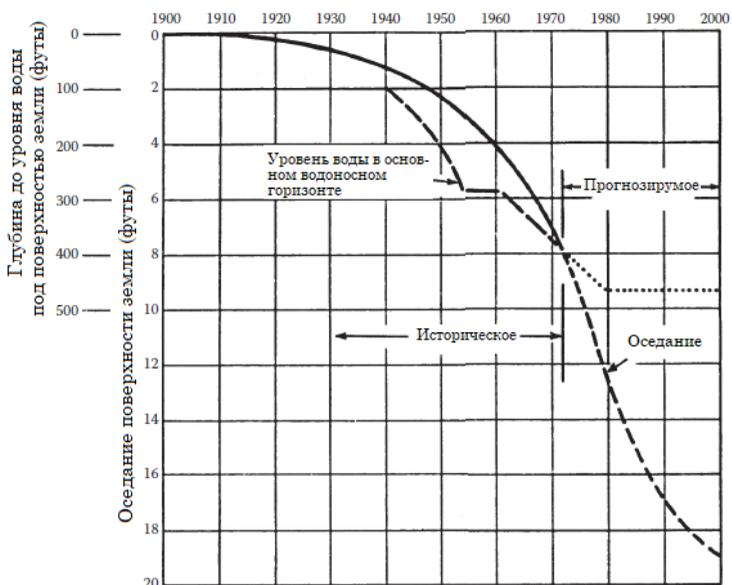


Рисунок 15.4. Прошлые и предполагаемое будущее оседание в районе парка Пасадена-Дир, город Хьюстон (по Marshall, A. F. [1973], The Slide Rule, Houston Engineering & Scientific Society, v. 33, n. 2, 6 p.).

15.5.2. Распределение напряжения в процессе обезвоживания

15.5.2.1. Неограниченный водоносный горизонт

Неограниченный водоносный горизонт существует, когда уровень грунтовых вод служит верхней границей насыщения почвы в отсутствие вышележащих непроницаемых слоев. Следовательно, пьезометрическая труба, пронизывающая неограниченный водоносный горизонт, покажет уровень воды. Во время или

после накачки фреатическая поверхность будет опускаться, и результирующее изменение будет называться просадкой. Увеличение эффективной нагрузки из-за снижения уровня грунтовых вод в неограниченном водоносном горизонте объясняется традиционной концепцией эффективной нагрузки.

15.5.2.2. Замкнутый водоносный горизонт

В ограниченном водоносном горизонте существует другая ситуация. Здесь подземные воды находятся под давлением относительно непроницаемых вышележащих и нижележащих слоев, так что вода будет подниматься над вершиной водоносного горизонта в пьезометрической трубе. Этот подъем, измеренный от основания пьезометра, называется пьезометрическим или напорным и представляет собой давление жидкости, существующее в основании трубки. Как только выходной канал обеспечен, вода высвобождается под давлением как при сжатии водоносного слоя и прилегающих глинистых пластов, так и при расширении ограниченной воды. Это сжатие пластов водоносного горизонта и глины может быть как постоянным (неэластичным), так и эластичным; следовательно, полное восстановление сжатия посредством рециркуляции воды под давлением может оказаться невозможным из-за этой неупругости.

Опускание пьезометрического напора в артезианском водоносном горизонте вызывает изменение эффективного напряжения. Предполагается, что верхний ограниченный слой не изменяет высоту уровня грунтовых вод. Опускание артезианского напора не меняет общего давления. В действительности некоторое уменьшение общего напора происходит из-за расширения воды во время ее удаления; это уменьшение считается незначительным и не отражается на распределении напряжений. Когда вода извлекается из артезианского водоносного горизонта, снижается давление. В результате вода выходит из-за:

- 1) расширения артезианского горизонта;
- 2) сжатия водоносного горизонта;
- 3) сжатия прилегающих глиняных пластов.

Сжатие водоносного горизонта обычно является упругим, как в случае песка или песчаника, в то время как пластическая деформация характерна для глиняных пластов или линз, прилегающих к водоносному горизонту.

15.5.2.3. Влияние откачки воды на глинистые слои

Если в недрах содержатся слои мягкой глины, ила или торфа, то понижение уровня грунтовых вод может привести к значительному оседанию земли. Физические причины этого явления показаны на рисунке 15.5, где представлен разрез через слой насыщенной глины, покрывающей проницаемый слой песка. Следующие объяснения дали Terzaghi и Peck (1967). На рисунке 15.5a предполагается, что пьезометрический уровень находится на поверхности земли; на рисунке 15.5b он был опущен на расстояние ΔH путем откачки из слоя песка. Перед откачкой эффективное давление на участке *ab* составляло:

$$p_{ab} = \gamma' H \quad (15.1)$$

где γ' – погруженная единица веса почвы. Во время и после откачки эффективное давление постепенно увеличивается до:

$$p_{ab} = \gamma \Delta H + \gamma' H_2 \quad (15.2)$$

где γ – единица веса насыщенного грунта. Изменение эффективного давления из-за понижения пьезометрического уровня составляет:

$$\gamma \Delta H + \gamma' H_2 - \gamma' H_1 = \Delta H (\gamma' - \gamma) = \gamma \omega \Delta H \quad (15.3)$$

В уравнении 15.3 указываются признаки того, что понижение уровня грунтовых вод на расстояние ΔH в конечном итоге увеличивает эффективное давление на горизонтальном участке через слой глины на величину, равную весу столба воды ΔH по высоте.

15.5.2.4. Коэффициент хранения

Lohman (1961) вывел уравнение для определения величины упругого сжатия артезианских водоносных горизонтов на основе снижения артезианского давления и гидрологических свойств водоносного горизонта. Это уравнение в основном основано на коэффициенте хранения, определяемом как объем воды, выделяемой водоносным горизонтом на единицу площади поверхности на единицу падения пьезометрического напора, перпендикулярного этой поверхности. Дальнейшие вычисления по коэффициенту хранения произвел Poland (1961). Применительно к уравнению Ломана предполагается, что часть воды, полученная из хранилища в глине, высвобождается мгновенно. Это не так из-за низкой проницаемости глин в целом и результирующего промежутка времени между падением давления и появлением воды, выделяющейся из хранилища. Понимая это явление, Poland смог объединить данные краткосрочных полевых испытаний насосов из города Лос-Банос-Кеттлман (Калифорния) в 1956 году, чтобы определить вклад каждого источника запасенной воды в общий коэффициент хранения.

На основе данных, полученных при полевом испытании насоса, Poland (1961) пришел к выводу, что для испытанной площади количество запасенной воды, выделяемой при пластическом сжатии пластов глины, в 50 раз больше количества воды, выделяемой как при упругом расширении, так и при упругом растяжении водоносного горизонта. Другими словами, коэффициент хранения, найденный с использованием только упругого краткосрочного анализа, который учитывает только сжатие водоносного горизонта, незначителен по сравнению с коэффициентом длительного хранения (в данном случае 15–25 лет), который учитывает сжатие глины. Исходя из этого, видно, что любой реалистичный расчет оседания должен учитывать сжимаемость слоев глины в течение определенного периода времени, а также его реакцию на любое изменение действующего в нем флюидного поля.

15.5.3. Прогнозирование оседания грунта

15.5.3.1. Общее обсуждение

Методы контроля в основном заключаются в прогнозировании прогиба в канале при различных скоростях откачки, при этом последующее обезвоживание будет ограничено скоростью, которая была бы неприемлемой для данной окружающей среды. Первым соображением, связанным с этим прогнозом, является геологическая обстановка, при которой происходит удаление подземных вод, и результирующие изменения давления, возникающие в результате этого удаления, чтобы вызвать оседание.

Подземные воды встречаются как в неограниченных, так и в ограниченных условиях, как обсуждалось в предыдущем разделе, и, следовательно, интерес представляет анализ напряжений, связанных с понижением уровня грунтовых вод для неограниченного водоносного горизонта и напора в ограниченном водоносном горизонте. Существуют многочисленные методы прогнозирования оседания грунтов в результате обезвоживания. Тем не менее в этом разделе описаны только два основных метода – метод Терцаги (Terzaghi и Peck, 1967) и метод Зееварта (1972), которые представлены в деталях. Кроме того, также сделано краткое сравнение механизмов этих двух методов.

15.5.3.2. Механизмы оседания вследствие обезвоживания

15.5.3.2.1. Оседание из-за первичной консолидации

Теория консолидации Терцаги объясняет гидродинамический процесс, при котором избыточное поровое давление, создаваемое увеличением нагрузки, передается фактической структуре почвы, что приводит к большему эффективному напряжению. Это добавленное эффективное напряжение вызывает упруго-пластическую деформацию и изменение объема структуры почвы, что приводит к оседанию поверхности земли (оседанию).

В материалах с низкой проницаемостью передача нагрузки на структуру почвы происходит постепенно и лучше всего представлена в виде кривых зависимости времени от консолидации. Теоретически, после того как все избыточное поровое давление было снято, произошло 100-процентное уплотнение, и дальнейшее осажение не должно наблюдаться. Кривая зависимости времени от консолидации должна стать горизонтальной; однако вместо того, чтобы приближаться к этой горизонтальной асимптоте, кривые расчета для большинства глин продолжают отклоняться, показывая дальнейшее урегулирование. Эта прогрессирующая деформация является вторичной консолидацией и обусловлена постепенной адаптацией структуры почвы к нагрузке в сочетании с сопротивлением вязкости поглощенной воды скольжению между частицами почвы. Этот случай не может быть объяснен с помощью концепций механической энергии (таких как аналогия поршень-пружина), как обсуждалось в разделе 11.5, которые используются для описания первичного уплотнения с помощью теории одномерного уплотнения Терцаги.

15.5.3.2.2. Оседание из-за вторичной консолидации

Любые глины, которые показывают значительные величины вторичной консолидации (такие как озерные и морские илестые глины и глинистые илы), должны иметь резерв для вторичной консолидации, если должны быть сделаны точные прогнозы расчета. Кроме того, поскольку этот вязкий поток имеет место при очень низких гидравлических градиентах в упомянутом типе насыщенных почв, он не может быть исключен из анализа оседания грунтовых вод. Представлены два уравнения прогнозирования, основанные на теории консолидации.

1. *Метод Терцаги*. Основанный только на первичной консолидации, этот метод может быть применен к областям, где на нее приходится большая часть проседания.

2. *Метод Зееварта*. Этот метод является расширением метода Терцаги и описывает дополнительное проседание из-за вторичной консолидации.

15.5.4. Метод Терцаги и метод Зееварта

15.5.4.1. Метод Терцаги (Terzaghi и Peck, 1967)

15.5.4.1.1. Гипотезы

Решение по методу Терцаги дает оседание грунта как функцию падения уровня грунтовых вод при различных давлениях вскрыши и свойствах почвы. Допущения аналогичны традиционной теории одномерной консолидации.

1. Любое упругое опускание из-за расширения воды и сжатия водоносного горизонта незначительно.

2. Масса почвы насыщенная, однородная и изотропная; следовательно, коэффициент проницаемости (k) и коэффициент объемной сжимаемости (m_v) одинаковы в каждой точке слоя и для каждой стадии консолидации.

3. Рассматривается теория одномерного уплотнения; следовательно, избыток воды стекает вертикально, а деформация почвы также происходит вертикально.

4. Изменение отношения пустот или объемной деформации приближается к конечному значению по окончании процесса первичной консолидации.

15.5.4.1.2. Формулы

Решение Терцаги описывает осадку грунта:

$$\Delta H = \frac{c_c}{1+e_0} H \log \frac{p_1 + \Delta p'}{p_1} \quad (15.4)$$

где ΔH – оседание грунта, c_c – индекс сжатия, e_0 – начальный коэффициент пустотности, H – толщина слоя, p_1 – давление вскрыши и $\Delta p'$ – изменение давления поровой воды (уравнение 15.3).

Изменение давления поровой воды дано в уравнении 15.3:

$$p' = \gamma_w h \quad (15.5)$$

где h – падение уровня грунтовых вод и γ_w – удельный вес воды.

Отметив, что c_c и e_0 в уравнении 15.4 являются свойствами почвы, мы определяем постоянную почвы c_1 следующим образом:

$$c_1 = \frac{c_c}{1 + e_0} \quad (15.6)$$

Уравнение 15.4 теперь можно записать в таком виде:

$$\frac{\Delta H}{H} = c_1 \log \frac{p_1 + \gamma_w h}{p_1} \quad (15.7)$$

Уравнение 15.7 решается для различных значений h и различных значений c_1 и p_1 . Затем просадка грунта может быть оценена для данного состояния почвы из-за падения уровня грунтовых вод (h).

15.5.4.2. Метод Зееварта (1972)

На практике мелкие отложения, демонстрирующие сжимаемость от средней до высокой и очень высокой, показывают вязкое поведение, а также упруго-пластическое поведение, которое следует учитывать при расчете оседания поверхности земли. Полное обсуждение теории, связанной с неупругим, пластическим и вязким поведением, приведено в работе Зееварта (1972, 1983) с дополнительным объяснением, которое дали Fang и Cleary (1976). Сравнение наблюдаемого и расчетного оседания поверхности земли, вызванного обезвоживанием, представлено на рисунках 15.6 и 15.7. Расчетные данные получены из уравнения Терцаги. Наблюдаемые данные были непосредственно измерены.

15.6. ОСЕДАНИЕ ШАХТЫ

15.6.1. Общее обсуждение

Горнодобывающая деятельность велась в основном в сельскохозяйственных районах, вдали от населенных пунктов, и, как следствие, оседание поверхности не имело серьезных последствий. Тем не менее из-за нехватки земли в результате увеличения разрастания городов, эти районы в настоящее время рассматриваются в качестве потенциальных строительных площадок. Кроме того, тот факт, что большие запасы угля остаются в городских районах в сочетании с повышенным спросом на уголь как источник энергии и существует экономическая необходимость максимальной добычи, также учитывает влияние проседания на повреждение существующих конструкций в результате активной добычи.

Согласно Британскому национальному совету по углю (BNCB, 1966, 1975) и работе Brauner (1973), движение поверхности земли из-за добычи полезных ископаемых может быть классифицировано на основе того, активна ли шахта или заброшена. Russell и соавторы (1979) предложили систему классификации оседания рудника с морфологическими характеристиками каждой системы, как показано в таблице 15.2. Оседание в шахтах подразделяется на три типа: (1) оседание выбоин, (2) линейное оседание и (3) региональное оседание. Характеры оседания и поверхностные и геологические характеристики каждой группы также описаны.

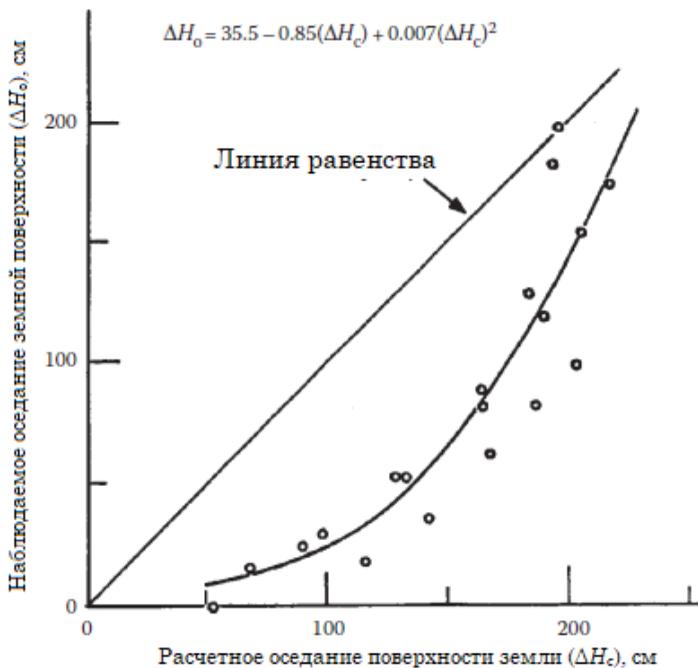


Рисунок 15.6. Сравнение наблюдаемого и расчетного оседания земной поверхности в результате процесса обезвоживания в бассейне Тайбэя, Тайвань (по Wu, С. М. [1976], Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, Anaheim, CA, pp. 389–398).



Рисунок 15.7. Влияние закачки на характеристики деформации подземных песчаных толщ в районе залегания шанхайской мягкой глины (по Su, Н. Y., [1979], Chin. J. Geotech. Eng., v. 1, n. 1, pp. 24–35. С разрешения CAS).

Таблица 15.2. Классификация шахтных просадок и морфологические характеристики.

Тип	Признак	Поверхностные характеристики	Ширина / коэффициент	Геологическая характеристика
Оседание выбоин	Отдельные функции	Одиночные круглые или прямоугольные углубления		Толстая вскрышная порода
	Трассы	Линейный ряд дискретных круглых или прямоугольных углублений	Диапазон от 1:1 для новых до 5:1 для стабилизированных выбоин	Различные положения породы (0°–90°)
	Сеть	Сеть близко расположенных выбоин		
Линейное погружение	До нелинейного	«Разорванный» вид трещин в скалах. Относительно гладкий обрыв породы вдоль совместных плоскостей	Гораздо глубже, чем в ширину; диапазон от 1:2 до 1:10+	Тонкая вскрыша; от горизонтального до мягкого падения породы
	Взаимосвязь	Образуется в результате соединения нескольких выбоин в линию, обычно вдоль обнажения		Умеренно крутые провалы
Региональное оседание	Неровные, круглые или прямоугольные формы влажных зон или сухих впадин	Большие (более 1 акра) заболоченные или заполненные водой участки, дифференцированные по возрасту; критерии включают остатки пня, хаотические растительные сообщества и свидетельства с исторических фотографий	Ширина гораздо больше, чем глубина; большое оседание ареала; вертикальное оседание колеблется от 1 до 10 футов	Толстая вскрыша, распространенная в аллювиальных долинах; от горизонтальных до пологих пластов

Источник: по Russell, O. R. Amato et al. (1979), Trans. Eng. J. ASCE, Proc. ASCE, v. 105, n. TE2, pp. 185–198.

15.6.2. Движение поверхности земли

15.6.2.1. Прерывистая деформация

Подземная разработка может вызвать серьезные трещины на поверхности земли, и основные их типы имеют вид (1) открытых трещин на поверхности земли, которые могут варьироваться от дюймов до футов в ширину, (2) ступеней на поверхности земли, где земля скользит по наклонным плоскостям, (3) глубоких ям, которые представляют собой локальные обвалы поверхности земли, которые могут быть шириной и глубиной в десятки футов. Величина прерывистых деформаций не может быть предсказана, но условия их вероятностного возникновения следующие:

1) при разработке рудных тел с большими вертикальными размерами (глубиной);

2) из-за резких изменений в типе породы, разломов или небольших трещин, которые способствуют образованию деформаций в виде ступеней и трещин;

3) в условиях, когда разрыв уже сформировался; дальнейший подрыв вызовет дополнительные разрывы;

4) в разрезах вдоль непрерывного прогиба, где существуют большие растягивающие деформации.

15.6.2.2. Непрерывная деформация

Непрерывные деформации характеризуются образованием впадины, сходной с движением грунта, связанным с удалением жидкости. Выделяются два типа смещений.

15.6.2.2.1. Абсолютные смещения

1. *Вертикальное смещение.* Вертикальное смещение может вызвать опускание фундамента ниже уровня неглубоких подземных вод, что может уменьшить зазор в плацдарме и т. д.

2. Горизонтальное смещение.

3. *Напряжение.* Напряжение определяется как производное горизонтального смещения и является либо растягивающим (положительным), либо сжимающим (отрицательным). Это может вызвать растягивающие и сжимающие разрушения и деформацию элементов конструкции. NSB Великобритании соотносит ущерб от горных работ с горизонтальной деформацией грунта, умноженной на длину конструкции, с результирующей классификацией, приведенной в таблице 15.3.

15.6.2.2.2. Дифференциальные движения

1. Наклон является производной от вертикального смещения по горизонтальной переменной. Это вызывает наклон зданий, изменение уклонов автомобильных дорог, железных дорог, инженерных коммуникаций и т. д.

2. Кривизна принимается за производную от наклона. Это может вызвать искажение каркасных структур, которое определяется как угловое изменение под прямым углом. Кроме того, это может вызвать изгибающие напряжения в каркасе здания.

15.6.3. Прогнозирование возможного повреждения поверхности

15.6.3.1. Общее обсуждение

Структуры, расположенные над зонами активной добычи, могут быть сильно повреждены из-за проседания грунта, если не будут приняты надлежащие контрмеры. Исследование масштабов и распределения поверхностных движений, возникающих в результате добычи полезных ископаемых, и необходимых структурных мер предосторожности для минимизации ущерба от оседания грунта проводилось в основном в Европе. Подход, используемый для контроля или минимизации, заключается в прогнозировании образования впадины при оседании при полном или частичном извлечении. Прогнозирование может сочетаться с подземными мерами предосторожности, так что временные и окончательные деформации не превышают допустимых значений, как показано в таблице 15.3. Существующие подходы к прогнозированию возможного повреждения поверхности, вызванного оседанием мест горной выработки, можно разделить на две широкие категории: эмпирические и феноменологические

методы. Эмпирический метод включает в себя метод функции профиля и метод функции влияния.

Таблица 15.3. Ущерб в связи с интенсивностью наземного напряжения.

Класс урона	Изменение длины конструкции	Изменение длины конструкции
Очень слабое или незначительное	До 3 футов (3 см).	Незначительные трещины, видимые на стенах и потолках внутри зданий, но не видимые снаружи
Слабое	От 3 см до 0,2 фута.	Незначительные трещины внутри здания; двери и окна не закрываются
Заметное	От 0,2 фута (6 см) до 0,4 фута (12 см)	Незначительные трещины как снаружи, так и внутри здания
Сильное	От 0,4 до 12,6 фута (18 см).	Утечки, разрушение газопроводов
Очень сильное	Более 0,6 фута (18 см).	Хуже, чем в предыдущем случае; требуется частичная или полная перестройка

Источник: по BNCB (1975), Subsidence Engineer's Handbook, British National Coal Board, London.

15.6.3.2. Эмпирический метод

Эмпирический метод основан главным образом на опыте, степени подземной добычи и наблюдении за наземными движениями. Brauner (1973) сводит основы эмпирических методов предварительного расчета к двум принципам.

15.6.3.2.1. Принцип суперпозиции

Это предполагает, что перемещения из-за какой-либо области добычи не зависят от наличия перемещений из-за другой области добычи. Следовательно, общее оседание, которое является результатом более чем одной разрабатываемой области, является просто суммой смещений, которые произошли бы, если бы каждая зона была разработана отдельно. Этот принцип включает в себя предположение, что максимально возможное оседание (S_{\max}), также называемое полным оседанием, зависит от толщины шва и может быть определено из следующего линейного выражения:

$$S_{\max} = a m \quad (15.8)$$

где S_{\max} – максимально возможное оседание, a – коэффициент оседания (таблица 15.4), этот коэффициент зависит от метода добычи и структуры, а m – толщина шва.

15.6.3.2.2. Принцип эквивалентности

Этот второй принцип гласит, что максимальное оседание (S_{\max}) в подкритической зоне зависит от размера разрабатываемого участка по отношению к его глубине. Это означает, что все области добычи, имеющие одинаковое отношение ширины к глубине, дают одинаковое оседание (здесь мы принимаем во внимание эквивалентные характеристики породы).

15.6.3.3. Метод функции профиля

Метод функции профиля основан на построении профиля оседания для рассматриваемой области добычи. Фактические функции профиля получаются путем интерполяции между несколькими точками поверхности, для которых заданы вертикальные смещения. Для критических областей центральная область желоба имеет постоянное опускание, равное S_{\max} (уравнение 15.8) на длине d от

края шахты (рисунок 15.8); вертикальное опускание равно $1/2 S_{max}$. Общие соотношения, показанные на рисунке 15.8, такие как точка перегиба на расстоянии d , фактически получены из результатов полевых наблюдений за схожими разрезами. В этом отношении также использовались модельные исследования (Lee и Shen, 1969). Фактические функции профиля получили и представили с более подробным комментарием Brauner (1973) и Chen и соавторы (1974).

15.6.3.4. Метод функции влияния

В этом подходе область извлечения рассматривается как область, состоящая из бесконечного числа бесконечно малых элементов. Затем используется принцип суперпозиции для получения вклада каждого из этих элементов в смещение в любой точке вдоль впадины погрузки. Этот вклад извлекающего элемента может быть выражен как произведение его собственной площади извлечения. Функции влияния могут быть получены из результатов наблюдений или могут быть основаны на независимых параметрах пласта, таких как предельный угол. Дальнейшее обсуждение этого вопроса и примеры функций влияния можно найти в работе Brauner (1973).

Таблица 15.4. Коэффициент оседания (α) и отношение максимального горизонтального смещения к максимально возможному оседанию.

Угльное месторождение, структура залежей	Коэффициент оседания (α)	Степень оседания
Британские угольные месторождения (BNCB, 1966)		
Полная закладка	0,45	0,16
Осыпание или расслоение структуры	0,90	0,16
Рурское угольное месторождение, Германия		
Пневматическая закладка	0,45	0,35–0,45
Прочие полные закладки	0,50	0,35–0,45
Обрушение	0,90	0,35–0,45
Угольное месторождение на севере Франции и Па-де-Кале		
Гидравлическая закладка	0,25–0,35	0,40
Пневматическая закладка	0,45–0,55	0,40
Обрушение	0,85–0,90	0,40
Верхняя Силезия, Польша		
Гидравлическая закладка	0,12	–
Обрушение	0,70	–
СНГ (Muller и соавторы, 1968)		
Донбасский район	0,8	0,3
Львовско-Вольнский район	0,8–0,9	0,34
Кизеловский район	0,4–0,8	0,3
Донецкий, Кузнецкий, Карагандинский районы	0,75–0,85	0,3
Подмосковный и Челябинский районы	0,85–0,90	0,35
Печора	0,65–0,90	0,3–0,5
США		
Пенсильвания		
Общие данные	0,5–0,6	–
50-процентная экстракция (Zwartendyk, 1971)	0,10	–
Питсбургский район (White, 1974)	0,15	–
Аризона (медная руда)		
Шахта Сан-Мануэль (Johnson и Soule, 1963)	0,7–1,0	–

Примечание: коэффициент оседания = максимальное горизонтальное смещение / максимально возможное оседание.

Источник: по Brauner, G. (1973), Information Circular 8571 and 8572, U.S. Bureau of Mines; Chen, Y. C. et al. (1974), Architectural Measures to Minimize Subsidence Damage, Report no. ARC-73-111-2551, Michael Baker, Jr., Beaver, PA, 130 p.

15.6.3.5. Феноменологический метод

Этот метод предполагает математическую замену грунта над пустотами рудников идеализированным материалом, который деформируется в соответствии с принципами механики сплошных сред. Используемые теории включают решения по упругости, вязкоупругости и растворам за пределами текучести; обобщение по этой теме можно найти в работе Voight и Pariseau (1970).

15.6.4. Меры предосторожности при активных подземных выработках

Поверхностные зоны могут быть защищены двумя подземными мерами – созданием опор безопасности и контролируемым подрывом. В обоих случаях важна концепция критической глубины, которая определяется как наименьшая глубина подрыва, за пределами которой деформация поверхности становится меньше заданного значения, то есть допустимой деформации конструкции. Следовательно, благодаря определенным мерам предосторожности критическая глубина может быть уменьшена.

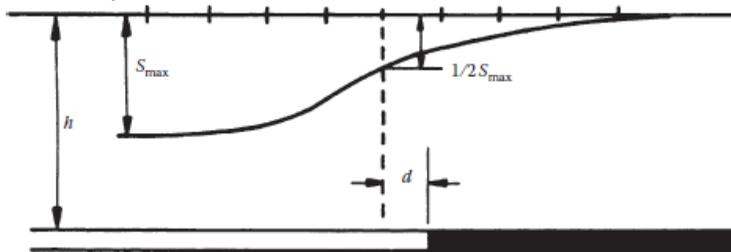


Рисунок 15.8. Функция оседающего профиля (по Brauner, G. [1973], Information Circular 8571 and 8572, U.S. Bureau of Mines. Этот материал является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не защищен авторскими правами).

15.6.4.1. Предохранительные столбцы

Проектирование целика удостоилось значительного внимания в Европе, оно основано на использовании функции влияния, из которой можно определить горизонтальное расстояние от конструкции, которой должна быть оказана поддержка. В США более распространенным является понятие угла защиты. Gray и Meyer (1970) описывают пример этого метода (рис. 15.9), в котором степень поддержки шахты определяется путем предоставления зоны шириной 15 футов вокруг периферии защитного объекта. Затем этот участок проецируется вниз и наружу под углом 15° от вертикали к уровню шахты, причем этот проектируемый участок является рекомендуемой зоной поддержки.

15.6.4.2. Контролируемый подрыв

Этот метод включает контроль подрыва, так что допустимые поверхностные деформации, временные или окончательные, не должны превышать. Это можно

сделать, избегая неблагоприятных схем добычи, путем укладки, частичного извлечения, быстрого подрыва и использования специальных геометрий добычи.

15.6.4.3. Закладка выработанного пространства

Эффект закладки отражается в коэффициенте оседания a из уравнения 15,8 и зависит от уложенного материала и метода закладки. Коэффициенты оседания между 0,3 и 0,7 были определены для пневматических, мягких и ручных способов укладки, в то время как гидравлическое укладывание вызывает коэффициент оседания в диапазоне от 0,10 до 0,30. Для достижения нижнего предела коэффициентов оседания желательно заполнять пустоты как можно раньше после выемки грунта и минимизировать открытые пространства путем плотной и тщательной закладки.

15.6.4.4. Частичное извлечение

Это включает в себя оставление регулярных проемов и колонн и упоминается в литературе как колонна или панель. Эффект таков, что движения грунта, исходящие от отдельных раскопок, обычно накладываются на единое общее углубление оседания (которое формируется по всей площади), так что на поверхности земли не возникает волнистости. Этот метод может использоваться в сочетании с укладкой для уменьшения оседания и повышения устойчивости стойки.

15.6.4.5. Быстрый подрыв

Целью этого метода является относительно быстрая добыча в сверхкритической области под структурой в целях сокращения времени, в течение которого условия добычи будут считаться неблагоприятными. Как только сверхкритическая область отработана, структура должна подвергнуться полному оседанию, но теоретически не должна испытывать никаких дифференциальных смещений.

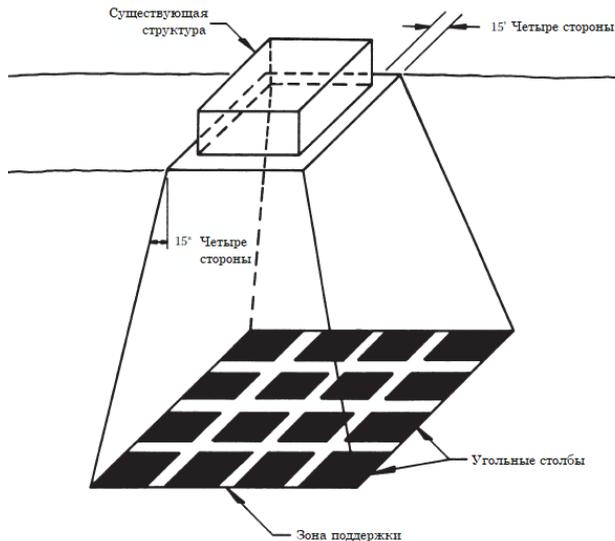


Рисунок 15.9. Угол метода защиты несущей конструкции (по Gray, R. E. and Meyer, J. [1970], JSMFE Div. Proc. ASCE, v. 96, n. SM4, pp. 1267–1287)

15.6.4.6. Специальная шахтная геометрия

Этот метод включает поэтапное удаление руды из критической области, так что поверхность земли понижается относительно плавно, а горизонтальные деформации уменьшаются или нейтрализуются. Панели работают одновременно, но в шахматном порядке, так что бегущие волны деформации для каждой панели будут стремиться подавлять друг друга, то есть максимальное расширение из-за одной обработки совпадает с максимальным сжатием из-за другой. Этот метод был назван гармоничным извлечением и обсуждается в работах Voight и Pariseau (1970), Brauner (1973) и Chen и соавторов (1974).

15.6.4.7. Структурные меры предосторожности

Модификации существующих конструкций для минимизации повреждений от проседания могут принимать форму постоянного усиления, временных опор или удаления элементов конструкции. В связи с этим, углубление вокруг конструкции, прорези и удаление кирпичной кладки или стекла может уменьшить эффекты сжатия. Растягивающие трещины, которые образовались в результате перемещения волн деформации, не должны заполняться немедленно, так как сжатие может последовать по мере того, как развивается общая впадина. В трубопроводах гибкие и телескопические соединения должны быть включены в систему труб, чтобы обеспечить большее движение без разрушения.

15.6.5. Заброшенные шахты

15.6.5.1. Характеристики заброшенных шахт

Риск оседания над заброшенными шахтами зависит от нескольких факторов:

- 1) размера и распределения существующих угольных столбов;
- 2) состояния горной породы над шахтой и под ней;
- 3) веса и толщины вскрыши;
- 4) изменения условий в шахте, то есть колебания уровня воды.

Рисунок 15.5. Ограничивающие факторы для различных типов движения.

Тип движения	Ограничивающий фактор	Максимальный расчет ¹
Общая усадка	Дренаж	6–12 дюймов (15,2–30,5 см)
	Доступ	12–24 дюйма (30,5–61,0 см)
	Вероятность неравномерного урегулирования	
	Кирпичные стены	1–2 дюйма (2,5–5,1 см)
	Каркасные конструкции	3–4 дюйма (7,6–10,2 см)
	Дымовые трубы, бункеры	3–12 дюймов (7,6–30,5 см)
Наклон	Устойчивость к опрокидыванию	Зависит от высоты и ширины
	Опрокидывание дымовых труб, башен	0,004 л
	Проезд грузовых автомобилей и др.	0,01 л
	Укладка	0,01 л
	Работа машины – турбогенератора	0,0002 л
	Крановые рельсы	0,003 л
	Дренаж полов	0,01–0,02 л
Дифференциальное движение	Высокие сплошные кирпичные стены	0,0005–0,001 л
	Одноэтажное здание кирпичного завода, растрескивание стен	0,001–0,002 л
	Растрескивание гипса	0,001 л
	Железобетонный каркас здания	0,0025–0,004 л
	Наружные стены из железобетона	0,003 л
	Стальная рама, сплошная	0,002 л
	Стальная рама, простая	0,005 л

¹ L – расстояние между соседними колоннами или между любыми двумя точками, которые устанавливаются по-разному. Более высокие значения даны для регулярных оседаний и более выносливых структур. Более низкие значения даны для нерегулярных оседаний и критических структур.

Источник: данные из: Sowers, G. F. (1976) and Chen, Y. C. et al. (1974), Architectural measures to minimize subsidence damage, Report no. ARC-73-111-2551, Michael Baker, Jr., Beaver, PA, 130 p.

С учетом этих факторов механизм разрушения включает медленное сползание крыши шахты и, возможно, шахты под угольным столбом, что в сочетании со сколами по краям столбов приведет к снижению эффективной поддержки столба. Разрушение одной колонны приведет к увеличению нагрузки на окружающие колонны и в конечном итоге приведет к широкомасштабному разрушению и обрушению кровли шахты, причем этот эффект ощущается на поверхности земли как быстрое опускание. Контроль над этой проблемой достигается либо с помощью специальных методов поддержки, либо с помощью определенных структурных мер предосторожности, которые включены в проект предлагаемой структуры. В таблицах 15.5 и 15.6 и на рисунке 15.10 приведена некоторая информация о расчете пределов и допустимой деформации для различных конструкций.

Таблица 15.6. Допустимое оседание рудника.

Угольный район	Напряжение		Наклон	Радиус кривизны	Коэффициент безопасности ¹	Конкретное применение
	Сжатие	Растяжение				
Англия ^b	1×10^{-3} для 100 футов (30 м) конструкции	—	—	—	—	—
Франция ^d	$1-2 \times 10^{-3}$	$0,5 \times 10^{-3}$	—	—	—	Для трубопроводов
Германия	$0,6 \times 10^{-3}$	$0,6 \times 10^{-3}$	$1-2 \times 10^{-3}$ для дома; $0,5 \times 10^{-3}$ для фундамента под машину	—	—	—
Польша СНГ	$1,5 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-3}$	—	—	—
Донецк	2×10^{-3}	2×10^{-3}	4×10^{-3}	20 км	400–550	—
Караганда	4×10^{-3}	4×10^{-3}	6×10^{-3}	3 км	250–300	—
Челябинск	—	—	—	—	300–400	—
Япония ^e	$0,5 \times 10^{-3}$	$0,5 \times 10^{-3}$	—	—	—	Для бетонных фундаментов
	1×10^{-3}	1×10^{-3}	—	—	—	Для деревянных зданий
	5×10^{-3}	5×10^{-3}	—	—	—	Для дна водоема

^a Коэффициент безопасности – безопасная глубина добычи / толщина шва.

^b По BNCSB (1966, 1975).

^c Допустимые деформации зависят от длины конструкции (см. рисунок 15.14).

^d По Grard (1969)

^e По Voight and Pariseau (1970), JSMFE Div. Proc. ASCE, v. 96, n. SM2, pp. 721–750.

Источник: Brauner, G. (1973), Information Circular 8571 and 8572, U.S. Bureau of Mines; Chen, Y. C. et al. (1974), Architectural measures to minimize subsidence damage, Report no. ARC-73-111-2551, Michael Baker, Jr., Beaver, PA, 130 p.

15.6.5.2. Методы поддержки и структурные меры предосторожности

Три основных метода поддержки обычно используются для обеспечения необходимой поддержки при проектировании фундамента: (1) цементация всей шахты, (2) установка цементных колонн для поддержки кровли основной шахты и (3) установка литых кессонов на месте или буровых свай для поддержки фундамента. Перед принятием решения должна быть исследована экономическая целесообразность каждого метода.

Методы цементации использовались в штате Пенсильвания более 30 лет. Основная цель этого метода – уменьшить длину пролета отверстий внутри шахты и укрепить разрушенные слои породы над шахтой, чтобы предотвратить оседание без заполнения всей пустоты и всех трещин. Большинство структурных мер предосторожности имеют следующую суть и могут быть использованы по отдельности или в сочетании друг с другом:

1) укрепление фундамента или надстройки жесткой конструкцией, чтобы можно было противостоять силам, передаваемым деформациями грунта;

2) гибкая конструкция, которая позволила бы структуре адаптироваться к передаваемым деформациям без потери прочности;

3) уменьшение сил, передаваемых деформациями грунта, путем:

а) использования небольшого плана площади строения;

б) обеспечения промежутков между смежными единицами больших зданий, которые позволили бы независимую деформацию блоков;

с) уменьшения связи между землей и сооружением;

д) прокапывания траншей вокруг зданий, чтобы поглотить сжимающие напряжения грунта, прежде чем они смогут добраться до здания;

4) ориентация предлагаемого здания с учетом существующих условий добычи, чтобы избежать возможных разрывов (кроме того, главная боковая ось здания должна быть параллельна линиям равного опускания, чтобы уменьшить влияние деформации).

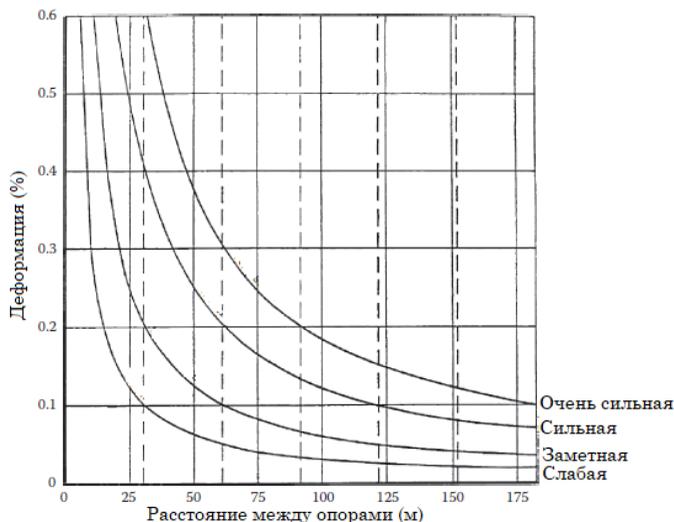


Рисунок 15.10. Отношение повреждения к длине конструкции и горизонтальной деформации грунта (по BNCB [1975], *Subsidence Engineer's Handbook*, British National Coal Board, London).

15.7. СТРОИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ

Три основных строительных операции, которые могут вызвать движение поверхности земли: (1) глубокие выемки грунта, (2) операция по забиванию свай и (3) взрывные работы.

15.7.1. Глубокие раскопки

Оседание из-за глубоких земляных работ, таких как создание траншей и карьеров, туннелирования и т. д., основано на том же принципе, который применялся для просадки грунта, а именно на наличии несбалансированных напряжений в области, окружающей открытый разрез. Опять же, существует тенденция к достижению состояния равновесия и форсированию смыкания, в результате чего происходит проседание поверхности, распространяющееся наружу из области раскопок. Кроме того, необходимо учитывать влияние боковых напряжений, создаваемых близлежащими конструкциями, на устойчивость раскопок. Скорость оседания в глубоких выработках обусловлена в основном соседними существующими конструкциями из-за неуравновешенной нагрузки.

Факторы, которые увеличивают эту тенденцию к смыканию, включают силы просачивания, которые действуют на боковые стороны разреза во время фазы обезвоживания конструкции. Непрерывная ползучесть под действием силы тяжести может снизить прочность на сдвиг и вызвать разрушение. Боковые нагрузки от вскрыши и поверхностные структурные нагрузки также должны учитываться. Необходимо рассчитать критическую высоту раскопок, минимальный зазор между пустотами и нагрузку на поверхность или нагрузку при строительстве. Эти значения могут быть получены с помощью общепринятых методов предельного равновесного или предельного анализа устойчивости склонов из стандартных геотехнических учебников.

Один из существующих методов прогнозирования реакции почвы на выемку грунта осуществляется с помощью эмпирических методов, аналогичных случаю активной добычи. Butler и Hampton (1975) описывают метод, позволяющий получить хорошее приближение наблюдаемого урегулирования. Ученые указывают на причины утраты грунта, попадающего в раскопки, по причине потери сцепления грунта из-за вызванных гидравлических уклонов во время осушения и из-за нарушения грунта при строительных работах. Они также отмечают, что эффективным средством контроля воздействия оседания на окружающие конструкции является использование подкрепляющих методов.

15.7.2. Операция забивки свай

Эффект забивки свай с точки зрения поверхностных движений – это возникновение поднятия грунта. Всякий раз, когда сваи забиваются, определенное количество почвы будет смещаться как по вертикали, так и по горизонтали, причем это количество зависит от того, насколько быстро могут рассеиваться избыточные поровые давления воды, которые накапливаются во время движения. Для несвязных почв чистое смещение почвы будет небольшим из-за быстрого осушения и результирующего сжатия внутри и вокруг сваи. Глина, однако, слишком непроницаема для изменения объема в течение короткого времени движения, в результате чего объем глины, равный объему сваи, смещается в сторону и вверх. Этот эффект усугубляется близкими расстояниями между сваями, где зоны смещения могут перекрываться, вызывая большее поверхностное волнение.

15.7.3. Динамическое уплотнение и взрывные работы

Процесс динамического уплотнения также является причиной проседания грунта во время строительных работ. Принцип динамического уплотнения обсуждался в разделе 11.4. Во время динамического процесса происходит некоторое оседание или проседание. Часто наблюдаются вибрации от механизмов и взрывных работ, вызывающие локальное разжижение.

15.7.4. Оседание, вызванное местными условиями окружающей среды

15.7.4.1. Подземные проемы

Подземные проемы связаны со многими причинами, такими как глубокие выемки грунта, провалы в грунте, проникновение загрязнений, подземная эрозия (из-за трубопроводов) и т. д. Механизмы оседания из-за этих подземных проемов обсуждается в работе Sowers (1976). Из-за сложности явлений Sowers указал, что многие оседания были ошибочно диагностированы, и значительные суммы денег были потрачены на меры по исправлению положения, которые были мало эффективны или вообще не принесли пользы. Оценка причин оседания требует четкого понимания геологии почв и горных пород. Оседание из-за каналов протекания растворов в растворимых формациях, таких как и провалы, обсуждалось в разделе 13.6; загрязнение окружающей среды будет обсуждаться в следующем разделе.

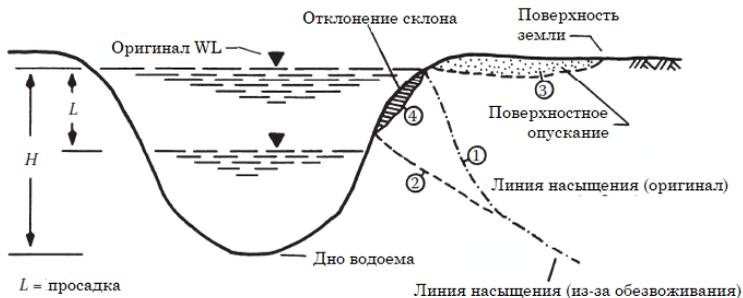


Рисунок 15.11. Оседание из-за быстрого сокращения заброшенного карьера в загруженной городской среде.

15.7.4.2. Быстрая просадка

Быстрое истощение озер и водохранилищ, вызывающее оседание земель в городских районах, является критической эколого-геотехнической проблемой. На рисунке 15.11 представлен пример изучения оседания в заброшенном карьере из-за быстрого обезвоживания, происходящего в загруженной городской среде. На рисунке 15.11 указывается, что точки 1 и 2 являются насыщенными линиями до и после обезвоживания. Точка 3 – это зона проседания грунта, а точка 4 – это область разрушения склона. Эколого-геотехнические проблемы, связанные с этой ситуацией, включают в себя систему обезвоживания (раздел 7.4), поверхностную эрозию (раздел 14.8), устойчивость горных пород и уклонов грунта (раздел 16.4), а также корректирующие действия (раздел 16.14).

15.7.4.3. Утилизация опасных или токсичных отходов

Существует три основных причины оседания грунта, вызванных опасными или токсичными отходами: (а) разложение почвы, (б) изменение состояния вещества и (с) изменение структуры почвы и воды. Краткое объяснение каждого случая представлено далее.

15.7.4.3.1. Оседание из-за разложения почвы

Типичным случаем является свалка. Разложение почвы является частью геоморфологических процессов, как обсуждалось в разделе 5.10 и показано на рисунке 5.16.

15.7.4.3.2. Состояние измененной материи

Поведение почвенных элементов изменяется при изменении состояния вещества. Благодаря тепловой энергии любой твердый объект может быть превращен в жидкость и газ (этот процесс обратим).

15.7.4.3.3. Изменение структуры почвы и воды

При изменении местных условий окружающей среды структуры почвы и воды также изменятся. Следовательно, изменятся объем, гидравлическая проводимость осадка и прочность на сдвиг. Степень изменения зависит от местных условий окружающей среды.

15.8. ГЕОАРХЕОЛОГИЯ И АРХАЕОГЕОТЕХНОЛОГИЯ

15.8.1. Общее обсуждение

В этом разделе представлена область исследований, сочетающая археологию и экологическую геотехнологию. Следовательно, вводится новый термин, а именно, геoarхеология для явной цели соединения двух ранее связанных областей в

единую систему (Fang и соавторы, 1999). Геоархеология определяется как геотехнические аспекты археологической науки, которая включает в себя следующие категории: использование геотехнических принципов и методов для извлечения или защиты различных типов подземных артефактов с использованием традиционной теории консолидации, чтобы помочь в оценке археологического времени этих артефактов, гробниц и их содержания, а также для защиты и обеспечения действий по модернизации как подземных, так и надземных исторических сооружений и объектов. В отличие от этого, археогеотехнология определяется как историческая геотехнология, подразумевающая методы классификации устойчивости склонов, фундаментов и других исторически ориентированных аспектов основных геотехнических проблем.

Археология с 1960 года постепенно перешла из сферы искусств в сферу наук. В идеале основными вопросами, вызывающими озабоченность археологов, являются хронологические методы, обследование местности, раскопки, защита, а также научный и антропологический анализ прошлых культур для понимания основ цивилизации. В большинстве случаев оставшиеся свидетельства прошлых культур довольно деликатны и требуют защитных методов для сохранения археологического происхождения для более точных текущих, а также будущих исследований. Таким образом, существует огромная потребность в применении научных методов экологической геотехнологии для оказания помощи искусству и науке в защите археологических источников, которые обычно в той или иной степени находятся под землей. Геофизические методы, такие как георадарные и сейсмические методы, сводят к минимуму возмущения на площадке с помощью различных методов отбора проб и СРТ. Геотехнология и археология имеют дело с наукой о Земле, которая должна быть соотнесена для достижения определенных подходов.

15.8.2. Типы и классификация проблем археологии

Существуют два основных типа археологических проблем: (1) как восстановить захороненные артефакты с наименее агрессивными условиями раскопок и (2) как защитить эти артефакты и их источники. Краткое изложение областей археологии, которые могут помочь в области экологической геотехнологии, приведено ниже.

1. Подземные артефакты.
 - a. Реликвии и останки.
 - b. Сооружения гробниц и связанные с ними сооружения.
 - c. Различные типы предметов: как обычные, так и сокровища.
2. Артефакты, существующие над поверхностью земли.
 - a. Замки и памятники.
 - b. Исторические здания и мосты.
 - c. Пагоды и башни.
 - d. Руины, пещеры и исторические поля сражений.
 - e. Храмы и церкви.
 - f. Улицы, дороги, деревни и города.

15.8.3. Природные и техногенные причины повреждения артефактов

Существуют два основных типа артефактов: одни скрыты под землей, а другие существуют над поверхностью земли. Поскольку окружающие их условия отличаются, причины повреждения этих артефактов также будут различными. Эти различия сводятся к следующему.

A. Находятся под землей.

1. Природные причины.

a. Вторжение подземных вод.

b. Норы животных и насекомых, таких как термиты и рыжие муравьи.

c. Вторжение корней деревьев.

d. Замерзание–оттаивание и увлажнение–высыхание.

e. Землетрясения и вулканы.

f. Оползни и опускание поверхности земли.

2. Антропогенные причины.

a. Вандализм и/или деятельность черных капателей.

b. Урон от войны и пожаров.

c. Загрязнения.

d. Подземный дренаж кислой шахты.

e. Подземные пожары.

B. Находятся над поверхностью земли.

1. Природные причины.

a. Ветра (тайфуны), торнадо.

b. Землетрясения и вулканическая деятельность.

c. Наводнения и дожди.

d. Замерзание–оттаивание и увлажнение–высыхание.

e. Пожары (от молний).

f. Вторжение корней деревьев и термитов.

2. Антропогенные причины.

a. Вандализм и поджоги (огонь).

b. Урон от боевых действий.

c. Кислотные дожди и снег.

d. Кислотный дренаж шахты.

Типы артефактов и последствия от причиненного ущерба влияют на восстановительные действия. Большая часть защиты подземного пространства после раскопок сосредоточена на том, чтобы минимизировать ущерб, принесенный раскопками и извлечением подземных артефактов. Поэтому выделяют три этапа работ: (1) этап планирования, (2) этап раскопок и (3) этап восстановления. На этапе планирования наиболее важна оценка археологического возраста и определение приблизительного места расположения артефактов.

15.8.4. Обследование участка, планирование, реконструкция и мелиорация

Первый этап – планирование археологических раскопок. На этапе планирования могут применяться три основные процедуры, отражающие геотехнические процедуры, связанные с окружающей средой: (а) применение методов статистической и вероятностной выборки, методов оценки риска и

принятия решений в отношении выбора испытательной площадки и выборки для уменьшить количество образцов, чтобы при этом сохранить надлежащую точность, (b) использование методов неразрушающего контроля (НК) с применением методов *in situ* для обнаружения подземных археологических объектов, включая гробницы и артефакты, чтобы уменьшить потенциальный ущерб этим артефактам; Методы неразрушающего контроля включают акустическую эмиссию, электрические волны или электромагнитные волны и т. д.; (c) определение подземных условий, связанных с почвой, горными породами и уровнем грунтовых вод, для этого используются стандартные методы отбора проб в соответствии с ASTM (ASTM D420).

После раскопок также необходимы дополнительные работы для повторного заполнения площадки и ее восстановления до первоначального состояния, чтобы предотвратить будущую эрозию или повреждение площадки из-за нарушения слоев почвы. Во многих археологических раскопках многие экспонаты подвергаются воздействию открытого воздуха, который затем подвергается воздействию погодных условий и факторов окружающей среды. После раскопок поверхность земель нарушена. В большинстве случаев требуется не только восстановить объект до его первоначального состояния, необходимо принять дополнительные меры защиты, чтобы сохранить его историческое происхождение.

Артефакты, расположенные над поверхностью земли, это исторические здания, памятники, храмы, замки, пагоды, а также мосты. Известными историческими сооружениями, фундамент которых был подвергнут восстановлению, являются Пизанская башня в Италии и Тигровая горная пагода в Китае. Меры по исправлению положения необходимы для того, чтобы восстановить все нарушенные поверхностные образования земли до исходного состояния. Различные типы корректирующих действий или методов укрепления грунта описаны в стандартных учебниках по геотехнике. Выбор корректирующих действий зависит от типов разрушений. Некоторые корректирующие действия сводятся к следующему.

1. Опускание грунта.
 - a. Свайные фундаменты
 - b. Крепления.
 - c. Сваи-колонны.
2. Наклон.
 - a. Крепления.
 - b. Свайные фундаменты.
 - c. Корневые сваи.
3. Неоднородная усадка.
 - a. Крепления.
 - b. Свайные фундаменты.
4. Трещины.
 - a. Герметизация.
 - b. Затирка и заливка.
5. Прочность и несущая способность грунта.
 - a. Стабилизация.
 - b. Химическая маршрутизация.
6. Устойчивость склона.
 - a. Корневые сваи.
 - b. Якорь и штифты.
 - c. Усиленная система заземления.

7. Высокий уровень грунтовых вод.
 - a. Дренажные системы.
 - b. Системы обезвоживания.

15.9. РЕЗЮМЕ

1. Оседание земной поверхности является одной из основных проблем в экологической геотехнологии. Причины оседания являются как естественными, так и искусственными. Среди этих причин наиболее важными являются обезвоживание и добыча полезных ископаемых.

2. Рассматриваются и обсуждаются различные системы классификации оседания и механизмы понижения вместе с явлениями разрушения.

3. Оседание земли по причинам, связанным с осушением и добычей, подробно обсуждается, включая методы прогнозирования и контроля.

4. Также изучается оседание, вызванное строительными процессами и факторами окружающей среды, такими как глубокие выемки грунта, операции забивания свай, взрывные работы, перемещение транспортных средств и т. д., а также опасные или токсичные отходы.

ПРОБЛЕМАТИКА

15.1. Различают оседание и проведание. Каковы основные особенности оседания?

15.2. По результатам лабораторных испытаний прогнозируется, что здание над слоем сжимаемой почвы высотой 7,6 м изменит среднее значение пустотности почвы с первоначального значения 1,12 до конечного значения 1,03. Каким будет оседание здания?

15.3. Приведенные данные: нагрузка $P = 500$ тысяч фунтов; единицы массы почвы = 120 pfc; удельный вес твердого вещества = 2,70; верхний предел пластичности = 35. Опоры были размещены на 8 футов ниже поверхности земли. Вычислите вертикальное оседание фундамента, если уровень грунтовых вод находится на расстоянии 5 футов от поверхности земли. Предположим, что почва обычно консолидирована.

15.4. Как и почему подземный пожар вызовет оседание поверхности земли и экологические проблемы в данном месте?

15.5. Как и почему корни деревьев могут вызвать опускание поверхности земли? Каковы отношения в системе дерево–корни–почва?

15.6. Как и почему движение по поверхности земли вызовет ее оседание? Какова глубина колеи дорожного покрытия? Как измеряется глубина колеи?

15.7. Как и почему бактерии и насекомые могут вызывать оседание поверхности земли?

15.8. Предполагалось, что взрыв заряда динамита в 249 N вызвал трещины в бетонной стене (или проседание), расположенной в 40 м от заряда. На промежуточном интервале находится река с известняковым и сланцевым дном. Стена и заряд были расположены в сланцах. Вас просят подать иск к строительной компании, которая предоставила динамит.

a. Опишите, что вы будете делать для проведения расследования.

b. Обсудите обоснованность претензии, используя вычисления для иллюстрации доказательств.

15.9. Как и почему опасные или токсичные вещества вызывают оседание поверхности земли? Каков механизм этого процесса?

16. Устойчивость склона Земли. Склоны и оползни

16.1. ВВЕДЕНИЕ

Стабильность земляных склонов и оползней принадлежат(или: относятся к) одной системе. Оползень является результатом неустойчивости склонов. Оползни происходят во многих частях мира, особенно в тех районах, где имеются проблемные почвы и неблагоприятные условия окружающей среды. Анализируя проблему оползней, инженеры и геологи часто смотрят на нее с разных точек зрения. Геолог рассматривает оползни как один из многих природных процессов, действующих в рамках геологического цикла. Их интересует только наземное движение в отношении геологических и гидрологических особенностей. С другой стороны, инженер-геотехник интересуется типами почвы, их инженерным поведением, максимальной высотой склона и максимальным углом наклона с точки зрения запаса прочности. В большинстве случаев такие специалисты не понимают геологических особенностей и факторов окружающей среды, вызывающих оползни. Даже в инженерной группе практикующий специалист часто интересуется измерениями свойств грунта и породы, движением грунта и условиями окружающей среды, однако теоретик интересуется идеализированной поверхностью разрушения, чтобы вписать ее в математическую модель.

Оползни происходят практически всеми мыслимыми способами, медленно или внезапно, с явной провокацией или без нее. Поскольку проблема оползней не является простой проблемой, она требует знаний из других дисциплин, поэтому для решения этой проблемы требуются совместные усилия геологов, инженеров-геологов и сейсмологов. Существует множество современных публикаций, посвященных устойчивости склонов и оползням, в них описываются эти различные аспекты (Broms и Wong, 1991; Fang и Mikroudīs, 1991; Morgenstern, 1992). Цель этой главы – представить экологические аспекты устойчивости земных склонов и возможности предотвращения оползней.

16.2. ПРИЧИНЫ И ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ОПОЛЗНЯМИ

16.2.1. Причины движения грунта

Причины движения грунта можно разделить на две группы – внешнюю и внутреннюю. Внешние причины включают нагрузки и условия окружающей среды. Условия нагрузки включают в себя дополнительную нагрузку, сейсмическую и взрывную вибрации, а факторы окружающей среды включают ливни, циклы сухой и влажной погоды, типы почвы, а в прибрежных районах – океанские волны, цунами и морскую эрозию. В большинстве случаев движения склона связаны с несколькими причинами. Внутренние причины обусловлены внешними факторами. Например, сильные ливни могут вызывать прогрессирующую эрозию, снижать прочность на сдвиг почв, таких как остаточные грунты, вызывать разрушение трубопроводов в дисперсионной глине,

изменять давление в поровой воде, изменять градиенты температуры и влажности во всех типах почв, в которых может наблюдаться массивное прогрессирующее растрескивание, и, наконец, все эти факторы будут ускорять возникновение оползней, как показано на рисунке 16.1.

16.2.2. Явления, связанные с оползнем

На рисунке 16.2 показана схема, иллюстрирующая некоторые явления, предшествующие разрушению, связанные с оползнем. В большинстве случаев разрушение склона или оползень не происходит сразу. Это происходит постепенно. Связанные явления включают растрескивание, сжатие, эрозию и ползучесть поверхности, которая затем приводит к поверхностному скольжению и чрезмерному оседанию. Когда наклонная почва достигает определенного уровня, например, от точки **a** до **b** на рисунке 16.2, внутреннее сопротивление почвы больше не может удерживать ее из-за внешних нагрузок, и в этот момент начинается оползневое или наземное разрушение.



Рисунок 16.1. Некоторые факторы, влияющие на устойчивость склонов и возникновение оползней.



Рисунок 16.2. Предотвращение явлений, связанных с оползнем.

16.3. ПОСТЕПЕННОЕ РАЗРУШЕНИЕ И ПОВЕРХНОСТНЫЙ ОПОЛЗЕНЬ

16.3.1. Общее обсуждение

Постепенные (прогрессирующие) разрушения, связанные с оползнями, эрозией и проскальзыванием поверхности, были признаны геологами и учеными в области сельского хозяйства с первых дней, а геотехническая инженерия, учитывая конструкцию земляной плотины, исследовала прочность на сдвиг сцепления глины и прогрессирующее разрушение вдоль возможной скользящей поверхности и указала, что прогрессирующее разрушение лучше всего оценивать на основе эмпирических соотношений между эффективным сопротивлением сдвигу, рассчитанным по фактическим разрушениям, и прочностью, изученной при лабораторных испытаниях.

16.3.2. Постепенное разрушение и поверхностный оползень

Многочисленные ученые количественно исследовали возможные последствия прогрессирующего разрушения. Vjertum (1967) предположил, что энергия, выделяемая в результате деформации *in situ*, может отличаться от энергии, получаемой при лабораторных испытаниях, и, таким образом, вызывать прогрессирующее разрушение. Поскольку движение поверхности всегда связано с поверхностной ползучестью и оползнями, многие исследователи пытались измерить скорость ползучести *in situ*. Скорость этих движений меняется в течение года, и движения часто ограничиваются поверхностным слоем. Скорость увеличивается по мере приближения к разрушению, и фактическое время оползня часто можно предсказать, отслеживая такое движения.

Chowdhury (1978) оценил прогрессирующее разрушение естественных склонов и исследовал напряжения на *in situ* на участке наряду с высокими скоростями, достигаемыми скользящей массой. Leonards (1979) также описал многочисленные истории случаев прогрессирующих разрушений, связанных с оползнями, исследовав прогрессирующие разрушения, связанные с мягкой глиной, сделал общий и эффективный анализ и изучив анизотропию прочности, а также деформацию и скорость деформации.

16.4. МЕТОДЫ АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНА

16.4.1. Общее обсуждение

В настоящее время существует множество методов для проведения анализа устойчивости склонов, которые обсуждаются в различных стандартных учебниках по геотехнике. Большинство из этих методов могут быть классифицированы как методы предельного равновесия и предельного анализа. Метод предельного равновесия широко используется в настоящее время благодаря своей простоте.

16.4.2. Методы предельного равновесия и предельного анализа

16.4.2.1. Метод предельного равновесия

Основное предположение о подходе предельного равновесия состоит в том, что критерий кулоновского разрушения выполняется вдоль предполагаемой поверхности разрушения, которая может быть прямой линией, дугой окружности, логарифмической спиралью или другой нерегулярной поверхностью. Свободное тело берется со склона и исходя из известных или предполагаемых значений сил, действующих на свободное тело, рассчитывается сопротивление грунта сдвигу, необходимое для равновесия. Затем это расчетное сопротивление сдвигу сравнивают с расчетной или имеющейся прочностью на сдвиг грунта, чтобы указать коэффициент безопасности.



Рисунок 16.3. Концепция предельного равновесия для анализа устойчивости склона: (а) силы, действующие на склон земли и (б) диаграмма сил.

Метод предельного равновесия широко используется в настоящее время; тем не менее он имеет присущие ему недостатки, среди которых наиболее важным является то, что он пренебрегает отношением напряжение–деформация почвы. В этом методе было сделано много улучшений, включая определение более приемлемых поверхностей разрушения, манипулирующих сил, действующих на поверхность разрушения, и распределение напряжений вдоль плоскости разрушения. Механизм концепции предельного равновесия для анализа устойчивости склона показан на рисунке 16.3. На рисунке 16.3а показаны силы, действующие на уклон земли, где W – масса грунта, S – прочность на сдвиг грунта вдоль поверхности разрушения, а R – результат. В течение срока службы конструкции W может слегка изменяться из-за колебаний уровня грунтовых вод, высыхания или смачивания. Однако прочность на сдвиг грунта (S) может резко измениться, как обсуждалось в разделах 5.10 и 11.8. Диаграмма сил, показанная на рисунке 16.3b для уклона земли, не представляет условия равновесия в любое время, потому что речь идет о разных силовых полях. Вес грунта – механическая сила, в то время как сила сдвига находится в силовом поле нескольких сред.

Существует множество методов предельного равновесия, доступных для оценки устойчивости склона, таких как метод Шведского круга, метод Бишопа, метод Моргенштерна, метод Хуанга, метод Коппулы и многие другие; все они рассмотрены в работе Fang и Mikroudís (1991).

16.4.2.2. Метод предельного анализа

Метод предельного анализа использует понятие критерия пластичности и связанного с ним закона течения. Метод основан на двух теоремах для любого тела или совокупности тел из упругопластичного материала, а именно: теорема о нижней границе и теорема о верхней границе. Согласно теореме о верхней границе, необходимо найти совместимый механизм разрушения, чтобы получить соответствующее решение. Поле напряжений, удовлетворяющее всем условиям теоремы о нижней границе, требуется для решения по нижней границе. Если верхние границы, заданные полем скоростей и полем напряжений, совпадают, то определяется точное значение нагрузки при сжатии.

Drucker и Prager (1952) ввели метод предельного анализа проблемы устойчивости склона. С тех пор этот метод был усовершенствован, а его применение было расширено. Основным преимуществом этого метода является то, что в большинстве случаев он обеспечивает решение в закрытой форме. Это также дает инженерам возможность получить физическую картину и помогает им визуализировать механизм разрушения. В некоторых случаях предельный анализ может помочь решить сложные проблемы, помимо предельного равновесия. С другой стороны, предельный анализ является относительно новым подходом, и он не знаком большинству инженеров-практиков и не получил широкого применения по сравнению с методом предельного равновесия.

16.4.3. Выбор параметров прочности и коэффициента безопасности

16.4.3.1. Выбор параметров прочности

Существуют различные требования к анализу стабильности для различных параметров прочности. Например, для кратковременного анализа устойчивости склона необходима общая прочность. Однако для долгосрочного анализа

необходимы эффективные параметры прочности. Для свехуплотненной глины предложена концепция остаточной прочности. Следовательно, выбор параметров прочности является основной частью анализа устойчивости, как обсуждалось в разделах 11.7 и 11.8.

Для коррекции параметра сдвига для анализа устойчивости мягких глинистых отложений был предложен метод Чекингского университета (1975), на который ссылается Fang (1980). Они утверждают, что прочность на сдвиг увеличивается с увеличением давления вскрыши, а уменьшается она из-за ползучести почвы или других неблагоприятных факторов. Следовательно, необходимо внести поправку для анализа устойчивости по результатам обычных испытаний на прочность на сдвиг, выполнив следующие процедуры:

$$S = (S_0 + S_c) = [S_0 + k(-u)] = [S_0 + k(1 - u)] \quad (16.1)$$

$$S = (S_0 + kU) \quad (16.2)$$

где S – скорректированная прочность на сдвиг, S_0 – тест на сдвиг из традиционного испытания на сдвиг, S_c – увеличение прочности на сдвиг, вызванное уплотнением – максимальное основное напряжение, u – изменение давления воды в порах из-за увеличения напряжения, U – степень уплотнения, равная коэффициенту; в основном из-за ползучести почвы, это значение колеблется от 0,75 до 0,90, $k = \sin\phi_{cu} \cos\phi_{cu} / (1 + \sin\phi_{cu})$ или:

$$S_c = z U \operatorname{tg} \phi_{cu} \quad (16.3)$$

где z – вертикальное напряжение, а cu – консолидированный угол трения; тогда:

$$S = S_0 + z \operatorname{tg} \phi_{cu} \quad (16.4)$$

16.4.3.2. Коэффициент безопасности, F_s

Как обсуждалось в разделе 12.5, коэффициент безопасности или степень безопасности используется инженерами для вычисления того, будет ли грунт разрушен в худших условиях эксплуатации, которые для него предусматривались. Нынешняя концепция определения коэффициента безопасности для большинства склонов Земли также основана на законе Кулона. Fellenius (1927) использовал отношение фактической прочности на сдвиг к критической прочности на сдвиг или отношение требуемой прочности на сдвиг (SR) к доступной прочности на сдвиг (S_A) как

$$F_s = S_R / S_A \quad (16.5)$$

Теоретически, когда F_s больше 1,0, склон устойчив; если данный коэффициент меньше 1,0, уклон будет критичным – и возникнет оползень. Концепция безопасности применительно к геотехнической инженерии обсуждается многими исследователями (Jumikis, 1967). Коэффициент безопасности также может быть получен из практического опыта, как показано в таблице 16.1, в которой приведены некоторые рекомендации по выбору подходящего коэффициента безопасности для анализа устойчивости склона.

16.4.4. Неопределенности и вероятность разрушения

Поскольку почва связана со многими проблематичными факторами, касающимися профилей почвы – состоянием напряжения и историей напряжений, ожидаемыми изменения в условиях нагружения, достоверностью гипотез, сделанных при анализе, изменении свойств почвы, определенные *in situ* или в лаборатории, и вариациями во время строительства, – результаты испытаний и вероятность разрушения могут измениться при расчете коэффициента безопасности. Многочисленные исследователи пытались рациональным способом оценить запас прочности, используя теорию вероятностей.

Таблица 16.1. Рекомендуемые факторы безопасности для анализа устойчивости склонов из остаточной почвы.

Класс	Тип профиля	Коэффициент безопасности	
		(А) Комплексное исследование на месте ¹	(В) Беглое исследование на месте ²
1	Профиль дороги или профиль в отдаленных районах, где вероятность угрозы жизни из-за аварии мала.	1.1	1.2
2	Профиль дороги на главном артериальном маршруте, где можно повредить магистральные коммуникации, а значит, возможен риск для жизни.	1.2	1.3
3	Районы, прилегающие к зданиям, где разрушение может повлиять на устойчивость здания (например, автостоянки), и присутствует значительный риск для жизни.	1.2	1.4
4	Профили, прилегающие к зданиям, где разрушение может привести к обрушению здания; очень большой риск для жизни.	1.4	Не применимо

¹ Такое исследование на месте, помимо обычного бурения, включает комплекс лабораторных испытаний для определения параметров прочности на сдвиг как для грунта, так и для породы. Будут проведены совместные системные обследования, и также будут рассмотрены возможные последствия на склонах сильных дождей. Эти эффекты будут включены в анализ почв и устойчивости горных пород.

² Исследование участка в соответствии с такой классификацией будет ограничено определением областей различных видов материала, типов породы, а также системы трещиноватости в случае проблем устойчивости породы. Параметры прочности на сдвиг будут получены из обратного анализа разрушений.

Источник: Binnie & Partners (1971), Construction on Slopes Manual, Hong Kong; Chiang, Y. C. (1979), Proc. Seminar on Slope Stability and Landslides, Chinese Institute of Engineers, Taipei, pp. 55–82.

На рисунке 16.4 показана вероятность разрушения и коэффициент безопасности в зависимости от угла наклона (β). S_u – это среднее значение недренированной прочности на сдвиг. Коэффициент вариации (V_{Su}) – это отношение стандартного отклонения к среднему; общепринято, что для отложений осадочной глины $0,2 < V_{Su} < 0,5$ (Lumb, 1966), это является приемлемым. Вероятность разрушения – это отношение затененной области к общей площади кривой распределения частоты на рисунке 16.4.

Различные формы распределения частот и различные значения V_{Su} могут быть получены при экспериментальном проектировании. Можно оценить вероятность разрушения в зависимости от угла наклона (β) для значений $V_{Su} = 0,1, 0,2$ и $0,5$, предполагая распределение частот по Гауссу. Leonards пришел к выводу, что если изменчивость прочности относительно велика, вероятность разрушения также велика. Взаимосвязь между фактором безопасности и вероятностью разрушения крайне нелинейна. Связь между изменением свойств почвы и вероятностью разрушения зависит от стратиграфии почвы, а также от геометрии и характера проблемы. Рисунок 16.4 может помочь в анализе и проектировании структур устойчивости склона. Другие исследования надежности и вероятности устойчивости приведены в работе Christian и соавторов (1992).

16.5. ВЛИЯНИЕ ДОЖДЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СКЛОНА

16.5.1. Количество осадков и интенсивность осадков

Взаимодействие почвы и воды, связанное со стабильностью почвенной массы, обсуждалось в главах 5 и 6. В тропических регионах основной причиной оползня являются осадки. Varata (1969) описал совокупность оползней и осадков в Рио-де-Жанейро. В 1966 и 1967 годах дождь шел в течение 2 и 3 дней, а затем через 3–5 недель последовал еще один сильный дождь такой же продолжительности. Зарегистрированная интенсивность осадков достигла 104 мм за 1 час, 321 мм за 24 часа и 675 мм за 72 часа. Varata отметил, что районы, где дожди нанесли наибольший ущерб, – это области, в которых есть уклоны и произошли оползни остаточных и коллювиальных почв. Склоны, где ущерб был наибольший, обычно колебались от 15° до 45° (Nunes, 1969).

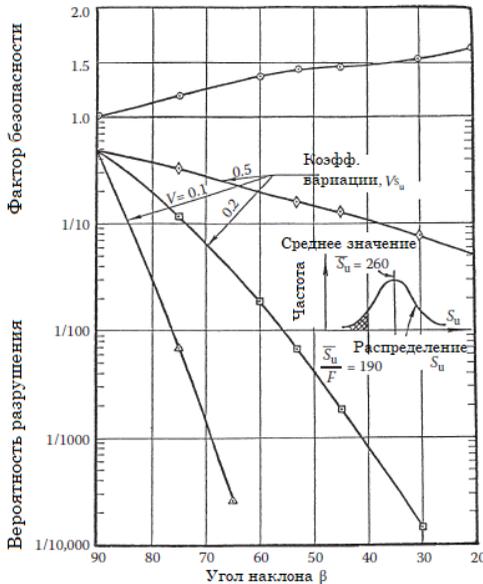


Рисунок 16.4. Коэффициент безопасности и вероятность разрушения в зависимости от углов наклона (по Leonards, G. A. [1979], Proc. 6th Panamerican Conf. SMFE, v. 1, pp. 225–274).

Таблица 16.2. Схема оползней, вызванных осадками, в регионе остаточных почв.

Однородные склоны	Обычно интенсивные дожди	Планарная горка Ротационная горка
	Очень интенсивные дожди	Лавины (быстрый поток)
Гетерогенные склоны	Обычно интенсивные дожди	Подвижность
	Очень интенсивные дожди	Совокупность осыпей

Источник: по Morgenstern, N. R. and de Matos, M. M. (1975), Proc. 5th Panamerican Conf. SMFE, v. 3, pp. 367–383.

Deere и Patton (1971) сообщили, что в Бонавентуре (Колумбия) после нескольких дней сильных дождей произошло более 100 сдвигов. Сдвиги начинались на гребнях склонов и, по-видимому, включали в себя несколько верхних метров остаточного слоя почвы и несколько метров выветренной породы над различными магматическими и метаморфическими породами. Склоны варьировались от 30° до 45°, при этом большая часть сдвигов превращалась в разрушительные лавины, которые оставляли следы шириной 20–30 м и длиной в сотни метров вниз по склону. Morgenstern и de Matos (1975) сообщили, что типы разрушения склонов связаны с интенсивностью осадков и типами склонов, как показано в таблице 16.2.

Влияние осадков и потока грунтовых вод на движения на склонах было изучено, и было обнаружено, что движение грунтов регулировалось направлением и величиной гидравлических градиентов грунта и волнообразными изменениями порового давления почвы, возникающими в результате сильных прерывистых осадков. Наличие этих нисходящих гидравлических градиентов спровоцировало движения склона. Потоки грязи, вызванные интенсивными осадками, связанными с нестабильностью склонов, изучали Brand (1982) и Sitar и соавторы. (1992). Вызванные дождем селевые потоки могут возникать в результате потери прочности почвы во время насыщения, когда быстрое поровое давление воды поднимается в периоды интенсивных дождей. Другие факторы устойчивости склонов и процессы на них, вызванные осадками, описаны в работе Fukuoka (1992).

16.5.2. Взаимодействие почвы и воды, относящееся к устойчивости склонов

Существует множество предложенных механизмов взаимодействия почвы и воды, связанных с разрушением склонов или оползнями. Некоторые из механизмов, взаимодействующих с поверхностной ползучестью и прогрессирующим разрушением, обсуждались в разделе 14.5. В следующем разделе представлены три возможных механизма взаимодействия почвы и воды, связанных с устойчивостью склона.

16.5.2.1. Механизм, основанный на физико-химической концепции

Данный механизм основан на прямом взаимодействии, когда вода воздействует на сухую почвенную систему, этот процесс происходит в соответствии с физическими и физико-химическими концепциями. Эти явления обсуждались в разделах 5.6 и 5.7. Winterkorn (1942) предложил использовать

физико-химические концепции для объяснения механики сухой когезионной глины, подвергшейся воздействию воды. Terzaghi (1943), рассматривая процесс набухания, назвал физические явления усадки и набухание незащищенного грунта отправной точкой постепенного разрушения грунтовых склонов. Применение электрической концепции для прогнозирования поведения почвы, воды, эрозии и прогрессирующего разрушения, связанного с разрушением грунта, описано в работе Arulanandan и соавторов (1973). Они сообщают, что лабораторные испытания могут показать, что эрозионное поведение почв из приподнятого грунта требует напряжения сдвига, чтобы инициировать эрозию, и зависит от типов и концентрации ионов в поровых флюидах и глинистых минералах. Типы и количество глинистых минералов определяются диэлектрической дисперсией (раздел 9.7).

16.5.2.2. Механизм, основанный на ионообменном эффекте

Как обсуждалось в разделе 4.8, эффекты ионного обмена в системе почва–вода имеют два основных аспекта: во-первых, ионный обмен, который изменяет свойства почвы, такие как сжимаемость и прочность на сдвиг; во-вторых, изменение характеристик электрохимии поверхности почвы, как обсуждалось в разделе 9.4. Данные о реакциях ионного обмена и другие химические эффектах, связанных со стабильностью склонов и оползнями, мы получили из работ Seifert и соавторов (1935), Matsuo (1957), Mitchell и Woodward (1973) и других.

Подробное исследование влияния катионного обмена на устойчивость склонов опубликовал Matsuo (1957). Было изучено влияние хлорида натрия, хлорида калия, соляной кислоты и хлорида магния в растворе на пределы Аттерберга трех японских почв. Исследование предусматривало различные концентрации каждого из этих электролитических растворов и их влияние на верхний предел пластичности, предел пластичности и индекс пластичности. Для илистых глин (MH и ML единой классификации почв) не наблюдается четкого изменения индекса пластичности для различных концентраций используемых электролитов. Однако для глинистой почвы (CL) индекс пластичности, а также верхний предел пластичности показывают заметное увеличение концентрации всей соли от 0,01 до 0,2 N. Увеличение верхнего предела пластичности указывает на увеличение прочности на сдвиг.

16.5.2.3. Механизм, основанный на концепции линейной механики упругого разрушения (LEFM)

Fang (1994a) представил аналогию между прогрессирующим разрушением, используя концепцию линейной механики упругого разрушения (LEFM), чтобы объяснить, как вода в трещинах связана с прогрессирующим растрескиванием и впоследствии приводит к отказу склона. Для любого глинистого склона некоторые трещины будут заполняться водой из-за неоднородного размера частиц почвы, градиентов температуры и влажности в почвенной массе и неравномерного уплотнения во время строительства, сезонных колебаний уровня грунтовых вод, осадков, таяния снега и т. д. Поровое давление в трещинах изменяется из-за этих факторов окружающей среды, капиллярное натяжение будет создаваться между частицами почвы. Когда насыщенная почва высыхает, в

каждой пустоте структуры почвы развивается мениск, который создает напряжение в почвенной воде и соответствующее сжатие в почвенном каркасе.

16.5.2.3. Механизм, основанный на концепции линейной механики упругого разрушения (LEFM)

Fang (1994a) представил аналогию прогрессирующего разрушения, используя концепцию линейной механики упругого разрушения (LEFM), чтобы объяснить, как вода в трещинах относится к прогрессирующему растрескиванию и впоследствии приводит к разрушению склона. На любом глинистом склоне некоторые трещины будут заполняться водой из-за неоднородного размера частиц почвы, градиентов температуры и влажности в почвенной массе и неравномерного уплотнения во время строительства, сезонных колебаний уровня грунтовых вод, осадков, таяния снега и т. д. Поровое давление в трещинах изменяется из-за этих факторов окружающей среды, между частицами почвы будет создаваться капиллярное натяжение. Когда насыщенная почва высыхает, в каждой пустоте почвенной структуры развивается мениск, который создает напряжение в почвенной воде и соответствующее сжатие в почвенном каркасе. Это сжимающее напряжение столь же эффективно при сжатии грунта, как и внешняя нагрузка. Давление 5–10 кН/м может быть получено в мелкозернистых почвах.

Эти начальные трещины и колебания давления в поровой воде между частицами почвы аналогичны надрезу и циклическому нагружению. Следовательно, рост трещины, разрушающая нагрузка и скорость выделения энергии деформации Гриффита могут быть оценены из лабораторных испытаний (раздел 6.8) и теории LEFM. Правильно было бы сказать, что колебания давления воды в трещинах ослабят структуру почвы, что приведет к образованию прогрессивных трещин и в конечном итоге приведет к разрушению склона. Многие исследователи сообщали о многочисленных разрушениях земляной плотины, связанных с этими поверхностными трещинами, и о трещинах, связанных с анализом устойчивости склона. Рисунок 16.4 показывает типичные разрушения или оползни, связанные с растрескиванием и растяжением почвы. Разрушение почвы начиналось с небольших трещин, постепенно они вызывали поверхностную ползучесть, а затем в поверхностные проскальзывания, как показано на рисунке 16.5a. На рисунке 16.5b показан режим разрушения, вызванный прогрессирующим растрескиванием в остаточной почве из-за сильных ливней в районе Букараманга в Колумбии. Основные причины разрушения грунта были связаны с влажностью, которая привела к снижению прочности почвы на растяжение (раздел 6.7).

16.5.2.4. Механизм, основанный на теории поля энергии частиц

На рисунке 16.6 показана устойчивость склона, вызванная осадками и связанная с различными силовыми полями. На рисунке 16.6 показана стадия взаимодействия почвы и воды вдоль поверхности потенциального разрушения. На этапе [1], когда дождевая вода поступает на склон, движение вызвано потенциальной энергией; когда же вода перемещается в почву, движение вызвано

кинетической энергией. Стадия [2] развития почвенно-водного взаимодействия обсуждается в главе 5.

16.5.3. Глубина насыщенной зоны (полоса увлажнения)

16.5.3.1. Глубина насыщенной зоны (без поверхностных трещин)

При анализе устойчивости склонов важно оценить влияние осадков на слои склонов. В общем, случаи скольжения ограничены верхними зонами примерно на 3–7 м ниже поверхности земли. Дождевые осадки порядка 35–50 мм/сутки будут существенно влиять на разложение гранитной породы в Гонконге, о чем сообщал Lumb (1962), это также обсуждалось в разделе 13.3. Влияние осадков на стабильность в толстых слоях остаточной почвы будет зависеть только тогда, когда интенсивность осадков будет того же порядка, что и проницаемость почвы. Продолжительность осадков должна быть достаточно большой, чтобы вода достигла значительной глубины. Сведения о дальнейшем исследовании устойчивости склона, относящиеся к глубине зоны насыщения или полосы смачивания для конкретного ливня, приводятся в работе Beattie и Chau (1976). Глубина, на которой может быть развита смачивающая полоса на определенном склоне, зависит от факторов окружающей среды, таких как:

- 1) интенсивность осадков и их продолжительность;
- 2) инфильтрационная способность поверхности почвы;
- 3) топография склона;
- 4) покрывающая растительность.

Толщина смачивающей полосы может быть определена из предельной скорости инфильтрации. Для оценки толщины полосы смачивания для ливней, имеющих различные периоды повторяемости, существует рекомендуемый период повторяемости; например, для Гонконга он составляет 1 на 1000 лет. Толщину полосы смачивания или глубину насыщенной зоны можно оценить, используя уравнение 16.6. Толщина полосы смачивания в зависимости от проницаемости почвы показана на рисунке 16.7.

$$h = \frac{kt}{(S_f - S_0)n} \quad (16.6)$$

где h – толщина полосы смачивания (глубина зоны насыщения), м; k – проницаемость грунта, м/с; t – продолжительность осадков, сек; S_f – конечная степень насыщения, %; S_0 – начальная степень насыщения, %; n – пористость грунта.



(a)



(b)

Рисунок 16.5. На фотографии показаны типичные разрушения склона, связанные с растрескиванием и растяжением почвы: (a) развитие трещин и (b) разрушение склона. (Фото любезно предоставлено CDMB, Колумбия, С.А.)



Рисунок 16.6. Механизм разрушения склона, вызванный ливнем и связанный с различными силовыми полями: (a) общий вид и (b) вид крупным планом.

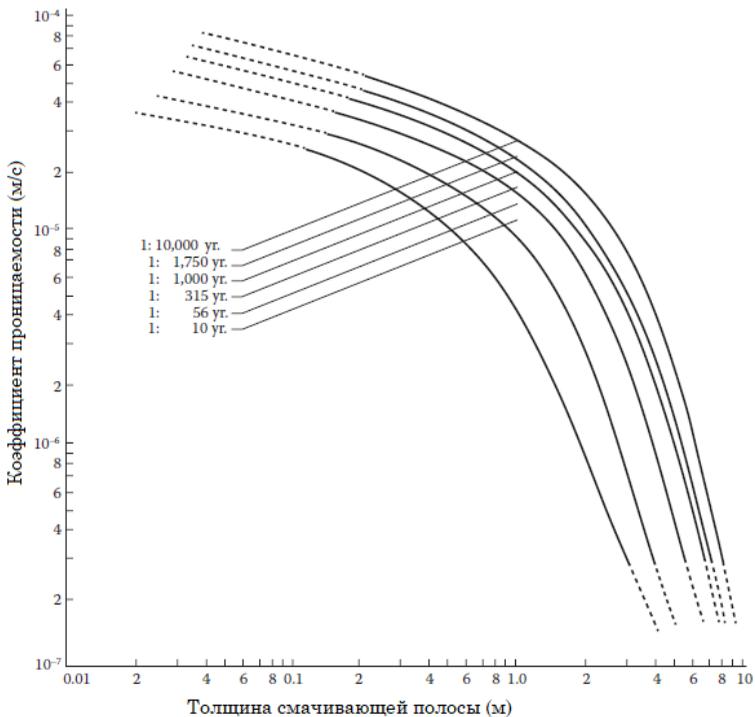


Рисунок 16.7. Толщина полосы смачивания в зависимости от проницаемости почвы (по Beattie, A. A. and Chau, E. P. Y. [1976], J. Hong Kong Inst. Eng., February. Cited by MAA Group [1980]).

16.5.3.2. Исправление полосы смачивания из-за трещин на поверхности земли

Уравнение 16.6 предназначено для приповерхностного грунта без каких-либо трещин. Однако в некоторых регионах поверхность земли имеет значительные трещины, поэтому уравнение 16.6 было изменено следующим образом для подсчета поверхностных трещин:

$$h = \lambda_c \frac{kt}{(S_T - S_0)n} \tag{16.7}$$

где λ_c – поправка на поверхностные трещины, эта величина варьируется от 1,05 до 1,15.

Типы трещин	Поправки, λ_c
Волосная трещина	1,05
Трещины типа «крокодиловая кожа»	1,10
Галерные трещины	1,15

16.6. ОПОЛЗНИ В ОСТАТОЧНЫХ ПОЧВАХ И ВЫВЕТРЕННЫХ ПОРОДАХ

16.6.1. Характеристики остаточной почвы

Остаточная почва и выветренная порода обычно встречаются во влажном жарком тропическом климате, особенно в периоды интенсивных осадков, как описано в предыдущем разделе. Как обсуждалось в разделе 13.3, остаточный грунт образуется в результате разложения *in situ* подстилающей породы вследствие протекания воды через трещины и поры породы. Иначе говоря, вода разрушает нестабильный материал породы. Химическое разрушение особенно активно в жарких и влажных регионах. По этой теме представлены два тематических исследования, иллюстрирующие оползни в остаточных и диспергирующих глинах в Букараманге (Колумбия) и в районе остаточных почв в Гонконге. Краткое обсуждение проблем и результатов представлены далее.

16.6.2. Тематическое исследование

16.6.2.1. Букараманга, Колумбия

Город Букараманга расположен в северной части Колумбии. Он построен на мезе, городская инфраструктура и местные жители с каждым годом все больше и больше страдают от проблем эрозии и оползней, особенно на обломках мезы. Проблема оползневой эрозии в области остаточного грунта и дисперсионной глины актуальна почти после каждого дождя. В настоящее время методы контроля ориентированы на поверхностные дренажные системы. На рисунке 16.5 и на рисунке 16.8 показано, что существуют критические экологические проблемы в районах с дисперсной глиной. Прогрессирующее разрушение склона в остаточно-дисперсионной глинистой области в основном связано с потерей прочности грунтов на растяжение.

16.6.2.2. Оползни в Гонконге, 1972

Из-за холмистой топографии Гонконга, сельскохозяйственные угодья на острове крайне ограничены. Горные районы в основном покрыты листвой, но местами сильно размыты. Население Гонконга увеличилось с примерно 600 000 человек в 1945 году до более чем 4 000 000 в конце 1971 года. Эта последняя цифра сделала Гонконг одним из самых густонаселенных районов мира со средней плотностью около 9800 человек на квадратную милю.

В оползнях в Гонконге типы почвы и геологические условия играют важную роль. По данным Lumb (1975), остаточные почвы образуются в результате разложения *in situ* подстилающей породы вследствие протекания воды через трещины в поры породы, при этом разрушаются более неустойчивые породы. По содержанию минералов местные граниты и прочие вулканические породы одинаковы, но в свежем граните размер кварцевых кристаллов составляет около

0,2–0,5 мм, а в других вулканических породах – около 0,02–0,2 мм. Сделанные наблюдения указывают на глубину разложения в пределах от 20 до 200 футов в гранитах, по сравнению с 10–50 футами в вулканических отложениях.

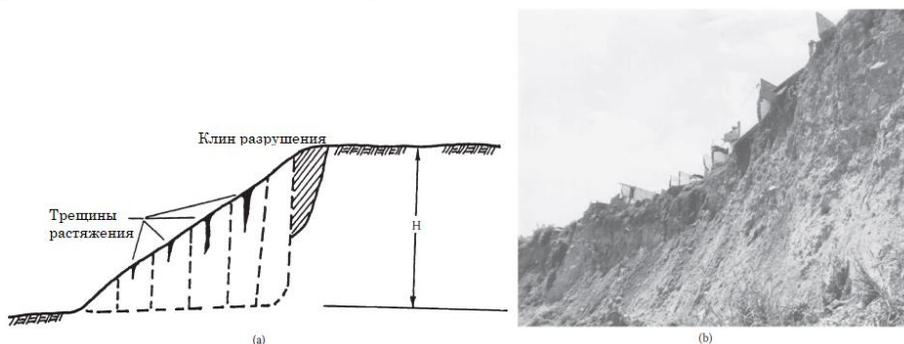


Рисунок 16.8. Прогрессирующее разрушение склона в остаточно-дисперсионной глинистой области из-за потери прочности при растяжении грунтов: (а) рисунок показывает разрушение на склонах при растяжении; (б) фото демонстрирует непосредственный вид. (Фото любезно предоставлено CDMB, Колумбия, С.А.)

Суть и результаты выветривания породы были описаны выше. Разложение начинается в суставах и трещинах и распространяется внутрь, образуя матрицу из разложившейся породы вокруг изолированных «керна-камней» или валунов. Перемещенные почвы образуются из остаточных почв либо в виде оползневой грязи, известной как коллювий, либо в результате эрозии поверхности почвы из-за ливневых дождей и ручьев в виде аллювия. Другие виды транспортируемой почвы возникают из морских отложений, песчаных пляжей и искусственных насыпок. Основной причиной обвалов на острове Гонконг в 1972 году стали проливные дожди на остаточных почвах. Зарегистрированные проливные дожди в мае и июне 1972 года сыграли доминирующую роль в возникновении оползня, который разрушил несколько высоких зданий.

Не существует стандартного метода(-ов) для исправления последствий оползня. Для определенного оползня или потенциального оползня редко существует один и только один метод восстановления. В целом, наиболее экономически эффективные средства профилактики состоят из комбинации двух или более методов, как описано в разделе 16.9. Для оползней на острове Гонконг наиболее важны поверхностные и подземные дренажные системы; следовательно, система поверхностного дренажа и стабилизация уклона с использованием сетки из сборного железобетона эффективны, как показано на рисунке 16.9.

16.7. ОПОЛЗНИ В РЕГИОНАХ С ДИСПЕРСИОННЫМИ И НАБУХАЮЩИМИ ГЛИНАМИ

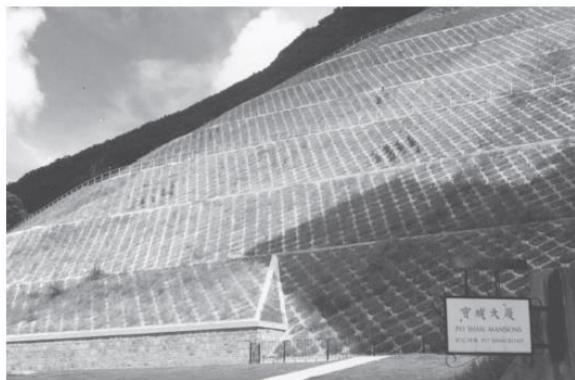
16.7.1. Области дисперсионных глин

Как обсуждалось в разделе 13.8, имеются признаки того, что некоторые мелкозернистые почвы, называемые дисперсионными, с более высоким содержанием растворенного порового натрия, чем обычные почвы, быстро

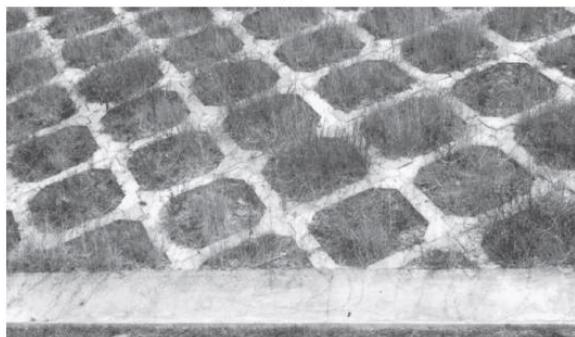
разрушают формирующие туннели и глубокие овраги в результате процесса, в котором отдельные частицы глины переходят в суспензию. Разрушение склонов и прогрессирующая эрозия могут разрушить целый населенный пункт, расположенный в районах с дисперсной глиной, таких как Букараманга, Колумбия.

16.7.2. Склоны из набухающей глины

Склоны из глины, объем которой изменяется, когда из-за сезонных климатических изменений меняется влажность, ускоренно разрушаются. Оползень в обширных почвах является значительным геоморфологическим процессом. Долгосрочное поведение почв естественных склонов в условиях влажного тропического климата представляет собой сложное явление с учетом изменений, происходящих в этих почвах из-за экологических причин. Выветривание почвы в сочетании с сезонным набуханием и усадкой изменяет свойства почвы и существенно влияет на прочность на сдвиг и характеристики напряжения–деформации. Деформация ползучести влияет на механизм оползня, и критерии постепенного разрушения становятся более подходящими при оценке устойчивости склона.



(a)



(b)

Рисунок 16.9. На фотографии показана сетка из сборного железобетона, используемая в Гонконге для защиты от оползней: (a) общий вид и (b) вид крупным планом.

Обычные процедуры обеспечения устойчивости на склоне неадекватны при рассмотрении долгосрочных воздействий окружающей среды на прочность на сдвиг и процесс деформации склона. Поэтому для реалистичной оценки устойчивости естественных склонов необходимо понимать естественные действующие механизмы. Некоторые из факторов, которые предлагает Ramana (1996), имеют решающее значение для анализа устойчивости склона; перечислим их.

1. Климат, выветривание почвы, загрязнение почвы и их влияние на свойства почвы и прочность на сдвиг.

2. Выбор надлежащих критериев прочности на сдвиг (раздел 16.4.3).

3. Условия залегания грунтовых вод: от этих условий зависит повышение порового давления и просачивание вод параллельно уклону.

4. Учет зависимости давления от набухания при расчетах устойчивости.

5. Стратиграфия и толщина выветрившегося слоя для оценки плоской или округлой поверхности скольжения; использование данных обследования электросопротивления (раздел 9.5).

6. Различия между поведением *in situ* и лабораторными испытаниями.

Вышеуказанные факторы должны быть рассмотрены, чтобы лучше понять особенности обширных глинистых склонов. Подробные обсуждения набухающих глин были представлены в разделах 6.3 и 13.4.

16.8. ОПОЛЗНИ НА УЧАСТКАХ СО СВЕРХУПЛОТНЕННОЙ ГЛИНОЙ

16.8.1. Механизм разрушения в свехуплотненных глинах

Многочисленные разрушения на склонах происходят в свехуплотненных почвенных отложениях, особенно при резке склонов и раскопках. Эти разрушения зачастую происходят неожиданно, и во многих случаях раскопки завершались в течение длительного времени, как сообщают многие исследователи. Существуют различные причины разрушений на склонах в свехуплотненных глинах. Разные ученые по-своему высказываются касательно трех следующих важных вопросов.

1. Естественное поведение свехуплотненных глин.

2. Задержки разрушений.

3. Возникновение разрушений.

Большинство исследователей считают, что для залежей свехуплотненной глины избыточное отрицательное давление в поровой воде развивается из-за разгрузки в результате земляных работ. Таким образом, чистая поровая вода является самой низкой в конце раскопок, а дальнейшее повышение давления поровой воды из-за равновесных значений происходит медленно в результате низкой проницаемости связных почв. Для анализа характеристик сдвига переуплотненных глин обычные испытания на сдвиг не подходят, поскольку они дают слишком высокое значение сдвига. Skempton (1964) предложил концепцию испытаний, показывающую, что прочность, остающаяся в лабораторных образцах после больших сдвиговых смещений, примерно соответствует расчетной прочности от оползней *in situ*, как обсуждалось в разделе 11.9.

16.8.2. Обзор различных механизмов разрушения

Многие сверхуплотненные глины сильно трещиноваты, и их массовая проницаемость может быть довольно высокой; следовательно, равновесные давления в поровой воде могут быть достигнуты очень быстро по сравнению с задержками, связанными с разрушениями склона. Веггум (1967) показал, что во многих тематических исследованиях проскальзыванию на склонах из слишком уплотненных глин и глинистых сланцев предшествует развитие непрерывной скользящей поверхности прогрессивного разрушения. Постепенное разрушение может быть результатом большого содержания восстанавливаемой энергии деформации глины в результате ее геологической истории. Леонардс (1979) представляет угол наклона в зависимости от времени до разрушения зерен лондонской глины. На рисунке 16.10 показана криволинейная зависимость; однако нет определенной зависимости между высотой реза, углом наклона и временем до разрушения.

Основываясь на обширных исследованиях и наблюдениях *in situ* на месторождениях сверхуплотненной глины, Китайский научно-исследовательский институт железных дорог (CRRI, 1979) указывает, что для сверхуплотненных глин, когда предварительное уплотнение достигает стадии остаточной прочности, ориентация частиц изменяется и электрический заряд увеличивается; следовательно, содержание влаги на поверхности сдвига также увеличивается. Когда объем увеличивается во время сдвига, пространство между зернами почвы увеличивается, что дает чрезмерно уплотненной глине отрицательное поровое давление, которое временно; следовательно, оно снижает сопротивление сдвигу.

Чоудхури (1980) суммировал некоторые из причин разрушения раскопанных сверхуплотненных лондонских глин. Объяснение неопределенности для первого разрушения включает возникновение разрушения и задержку разрушений. Методы анализа устойчивости склона из сверхуплотненных глин в основном базируются на концепции предельного равновесия. Предполагаемые свойства материала: модель растяжения, хрупкость и реологическая модель, а также процесс хрупкого размягчения. МакГиффи (1982) описал строение наклонных склонов из сверхуплотненных глин с конкретными примерами.

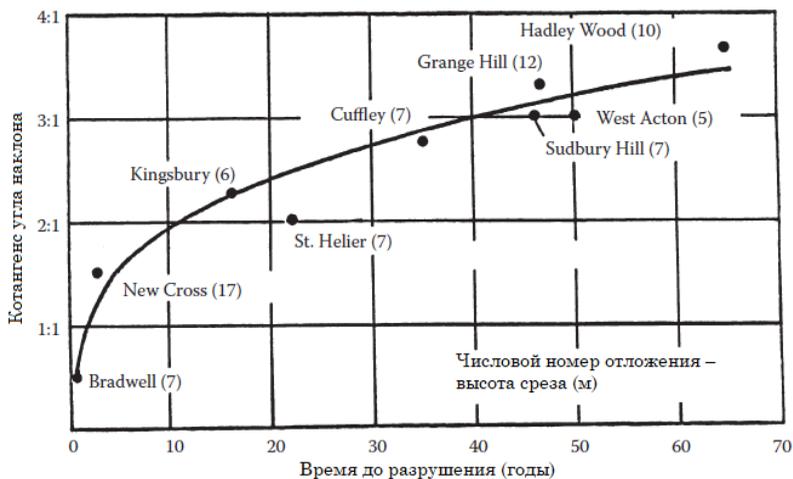


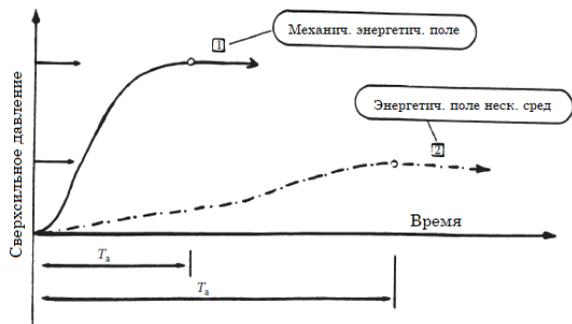
Рисунок 16.10. Угол наклона в зависимости от времени до разрушения зерен коричневой лондонской глины (по Leonards, G. A. [1979], Proc. 6th Panamerican Conf. SMFE, v. 1, pp. 225–274).

При проектировании глинистых склонов для долгосрочной устойчивости нужно учитывать режим разрушения и использовать методы испытания грунта, методы анализа и выбора параметров прочности и зависимости устойчивости от времени. Разрушения на склонах в свехуплотненных глинах могут быть оценены на основе сухого сдвига. Laguros и соавторы сообщают о разрушении склонов в выветрившейся свехуплотненной глине. (1982). Также представлены комментарии и предложения по устойчивости свехуплотненных глин.

16.8.3. Эколого-геотехнический подход

Точные причины и механизмы разрушения свехуплотненных глин не совсем понятны. Fang и Mikroudís (1991) предложили концептуальную модель, показанную на рисунке 16.11, указав причины избыточного давления, как обсуждалось в разделе 11.7. Дальнейшие обсуждения представлены ниже.

На рисунке 16.11 отражены две причины чрезмерного уплотнения почвы в окружающей среде. Одна из них связана с нагрузкой, а другая – с факторами окружающей среды, такими как кислотные дожди, кислотный дренаж и опасное или токсичное проникновение, которые приведут к изменению ионообменной реакции, как обсуждалось в предыдущем разделе. Как правило, причина нагрузки серьезнее, чем причина, вызванная факторами окружающей среды, которые потребуют больше времени для создания такого консолидированного давления. С другой стороны, время, необходимое для первого разрушения, указывает на то, что экологически обусловленный случай занимает больше времени. Для этих двух причин решение для оценки времени первого разрушения также будет другим. Иными словами, в случае нагрузки подход должен следовать за полем механической силы, как указано в таблице 2.2 и разделе 11.7. Однако в измеряемых в настоящее время методах независимо от причины все используют подход нагрузки, такой как метод Casagrande (раздел 11.5). В настоящее время разрушение склонов и оползни в областях чрезмерно уплотненной глины все еще не могут быть эффективно решены.



(a)



(b)

Рисунок 16.11. Концептуальная модель механизмов разрушения сверхплотненной глины: (а) избыточное давление в зависимости от времени, (б) деформация в зависимости от времени.

16.9. ОПОЛЗНИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

16.9.1. Сползание склона на отмели

Причины оползней связаны со многими факторами; однако оползни, вызванные землетрясениями, наносят нам больший ущерб, чем оползни, вызванные другими причинами, о чем сообщается во многих опубликованных документах (Seed, 1991; Chaney и Pamukcu, 1991; Marcuson и соавторы, 1992). В целом, оползни можно разделить на два типа: разрушение на небольшом склоне и разрушение на большом склоне. Yen и Wang (1977) сообщили о различных видах сейсмических разрушений склонов; наиболее распространенным типом разрушений является скольжение по склону холма. В большинстве случаев малая глубина составляет менее 2 м пропорционально длине, приблизительно 10 м или более, с обширными растягивающими трещинами вблизи верхней части смещающейся породы. Аналитическое решение для сползания пологого склона, вызванного землетрясением, разработали Yen and Wang (1977). Данное решение было основано на одномерной модели прогрессивного разрушения. Также

отмечается, что разрушения на небольших склонах сильно отражают местные и геологические особенности (Seed и Schnabel, 1972), типы почв и местные условия.

16.9.2. Глубокий обрыв склонов

Глубокий обрыв склонов вызван в основном сжижением грунта. Seed (1975, 1991) представил подробный обзор оползней, вызванных разжижением почвы, во время землетрясения. В обзоре обобщены все основные оползни в мире – с 373 г. до н. э. до 1975 года. Продолжая работу названного ученого, Chaney и Fang (1991) представили дополнительную информацию о воздействии землетрясения на оползни. Данные включают в себя величину землетрясения, местоположение скольжения, эпицентрального расстояние, тип структуры и типы почвы, а также подробные ссылки на обсуждения, имеющиеся в работе Chaney и Pamukcu (1991).

16.10. ОПОЛЗНЕВАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СКЛОНОВ И ПРОБЛЕМА ОПОЛЗНЕЙ В НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ УСЛОВИЯХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Существует множество типов неблагоприятных сред, вызывающих разрушение склонов. Одни причины более важны, чем другие. Независимо от причин, должное внимание должно быть уделено тому, что позволит избежать дальнейших осложнений. Некоторые из этих причин являются частыми, поэтому их краткое обсуждение представлено ниже.

16.10.1. Воздействие каротажных работ и корней деревьев

Строительство дорог в лесных районах и связанная с этим вырубка деревьев увеличивают локальную активность скольжения почв примерно в пять раз по сравнению с нетронутыми участками. Отчеты об обширных исследованиях в водосборном бассейне Редвуд-Крик показывают, что лесозаготовительные работы соответствуют увеличению движения склонов в этом районе, но что местная геология и характер почвы также являются важными факторами в мобилизации склонов. В бассейне реки Ван Дюзен в северной Калифорнии обнаружилось значительное увеличение движения склона, происходящее из-за того, что выпас домашних животных изменял характер растительности на склонах.

Лесохозяйственная и сельскохозяйственная практика и вытекающие из нее изменения растительности могут напрямую влиять на устойчивость склонов, на которых непосредственно осуществляется деятельность. Преимущества использования корней деревьев для укрепления грунта обсуждали Gray и Leiser (1982) и Wu (1984). Однако у данного метода есть недостатки, поскольку некоторые корни деревьев влияют на устойчивость склонов земли. Наличие растительности и корней создает множество каналов для проведения свободной воды в почвенной массе. Схемы подповерхностного стока нарушаются, и в почве не образуются пограничные слои. Наличие органического мусора может увеличить макропроницаемость почвы, а также увеличить свободный дренаж.

Насыщенная микропроницаемость увеличивается, и некоторое количество воды удаляется через растения.

Взаимодействие почвы и корней указывает на то, что форма ветвей деревьев пропорциональна форме их корней. Это означает, что высокие деревья или растительность имеют более глубокую или большую область распространения корней. Это соотношение можно записать так, как предложил Fang (1991c):

$$(W_T)(H_T)(\gamma_T)(\sigma_T) \approx (W_R)(D_R)(\gamma_R)(\sigma_R)$$

где W_T , W_R – ширина ветвей или корней деревьев, H_T – высота деревьев, D_R – глубина корней деревьев, γ_T , γ_R – плотность ветвей или корней деревьев, а σ_T , σ_R – прочность на растяжение ветвей или корней деревьев.

Для того чтобы дерево было устойчивым, корни должны служить так же, как служит фундамент для строительных конструкций, поэтому чем выше или больше дерево, тем глубже или шире должно быть распределение корней. Бамбук является единственным исключением, потому что сам бамбук может расти на высоту 80–100 футов над землей, тогда как глубина корневой системы проникает в землю только от 18 до 24 дюймов. Для того чтобы бамбук мог стоять на земле, прочность бамбуковых корней и величина областей распространения корней должны быть чрезвычайно велики, иными словами, корни должны охватывать большую площадь. Живые бамбуковые корни могут проникать в 6-дюймовую бетонную стену. Многие дороги, тротуары и дренажные сооружения были повреждены живым бамбуком. На рисунке 16.12 показано влияние корней деревьев на устойчивость склона земли.

На рисунке 16.12 представлены (1) наклон земли, (2) плоскость потенциального разрушения, которая может быть оценена из обычного анализа устойчивости склона и может быть получена из стандартных учебников, (3) зона потенциального разрушения, (4) дерево и ветви над поверхностью земли, (5) корни деревьев под поверхностью земли, (6) ветровая нагрузка, когда она воздействует на дерево. Определенная часть слоя почвы будет нарушена через корни деревьев, как показано в (7) и (8). В таких случаях поверхность потенциального разрушения склона изменяется. Иными словами, корни деревьев могут стабилизировать склон, с одной стороны, и могут нарушать устойчивость склонов, как показано на рисунке.

16.10.2. Влияние излишней срезки грунта или земляных работ

В перегруженных холмистых городских районах часто происходит срезка грунта, в основном из-за нехватки равнинных земель. Высокая стоимость формирования участка приводит к срезанию склонов, чтобы освободить место для зданий. В зонах срезки обычно используются удерживающие конструкции для поддержания давления грунта, окружающего строительную площадку. Важно, чтобы критическое местоположение, минимальные глубины и минимальная прочность удерживающей конструкции были известны на этапе планирования.

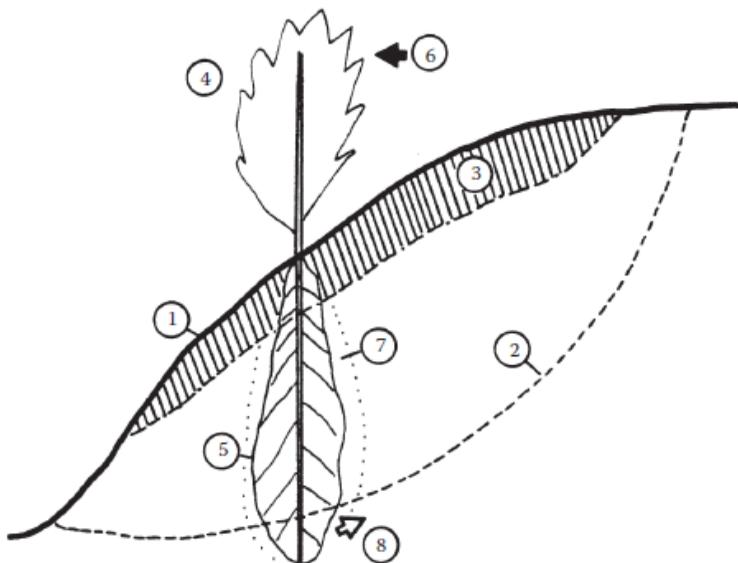


Рисунок 16.12. Влияние корней деревьев на устойчивость склонов.

16.10.3. Влияние кислотного дождя и кислотного дренажа на устойчивость склона

Как кислотные дожди, так и кислотные дренажи являются природными электролитами, как описано в разделах 5.4 и 5.5. Кислоты влияют на почвы следующим образом:

- повышают активность ионообменной реакции (раздел 4.8);
- ускоряют окислительно-восстановительные реакции (раздел 5.4);
- изменяют объем и схемы растрескивания (раздел 6.8);
- изменяют гидравлическую проводимость (раздел 7.3);
- изменяют консолидацию (раздел 11.5).
- изменяют прочность на сдвиг (раздел 11.7).

Основываясь на этих изменениях, можно утверждать, что кислотные дожди или дренажные воды увеличат трещины на поверхности склона, прогрессирующую эрозию, оседание и т. д., что приведет к разрушению склона быстрее, чем если бы влияние кислотного дождя или дренажной воды отсутствовало.

16.10.4. Устойчивость морского склона (под водой)

Морские склоны обычно довольно пологие и однородные на обширных горизонтальных поверхностях. Таким образом, во многих случаях применимы методы предельного равновесия с «бесконечным наклоном». Одну из первых процедур, предложенных для оценки устойчивости морского дна под

воздействием волн, описал Henkel (1970). Описанная им аналитическая модель представляет собой анализ общего напряжения (без учета давления в поровой воде почвы), основанный на принципе ограничения равновесия и использовании предположения о круговой поверхности разлома. Finn и Lee (1979) представили результаты более общего метода эффективных напряжений, который, помимо нагружения волнами, также включает нагрузку от землетрясения и избыточного порового давления. Chang и соавторы (1983) представили сейсмический фактор безопасности подводного склона с помощью процедуры предельного анализа. Следует отметить, что основные проблемы для оценки устойчивости морских склонов состоят в том, что полевое подтверждение исследований устойчивости склонов является минимальным.

В настоящее время возможно измерение давления в поровой воде, что позволяет применять эффективные методы анализа напряжений для оценки устойчивости морских склонов. На рисунке 16.13 представлены процедуры определения устойчивости морского склона, которые предложили Richards и Chaney (1982). На рисунке 16.14 отражен процесс оценки морского склона Chaney (1984).

16.11. ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ОПОЛЗНЕЙ, КОНТРОЛЬ И ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ

16.11.1. Общее обсуждение

Как говорилось ранее, движение земли или ее ползучесть связаны с оползнями. Поэтому важны измерительные и контрольные системы для уклона и движения грунта. Таблица 16.3 представляет собой сводку контрольно-измерительных систем, которые включают типы приборов и измеряемые параметры. Измерение свойств почвы *in situ* в различные периоды времени также важно для анализа оползней. Broms и Wong (1991) предлагают мероприятия для исправления склонов. Данные мероприятия охватывают геометрические, гидрологические, механические и физико-химические методы. Далее рассматривается контроль оползней методами зонирования и микрозонирования.

16.11.2. Сложные условия для почвы

Борьба с оползнями проводится в сложных почвенных условиях, отмечающихся на остаточных участках почвы, в лессовых отложениях, трещиноватых глинах, дисперсионных глинах и сверхуплотненных почвах. Данная тема будет обсуждаться в следующем разделе.

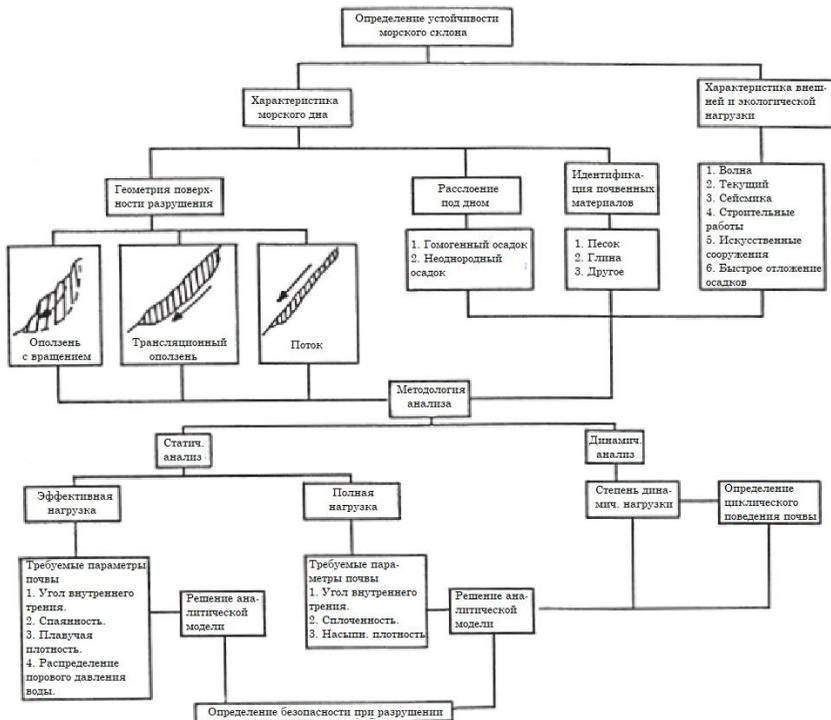


Рисунок 16.13. Определение устойчивости морского склона (по Richards, A. F. and Chaney, R. C. [1982], Proc. NATO Conf. on Marine Slides and Other Mass Movements, pp. 163–172. С разрешения от Springer Science + Business Media).

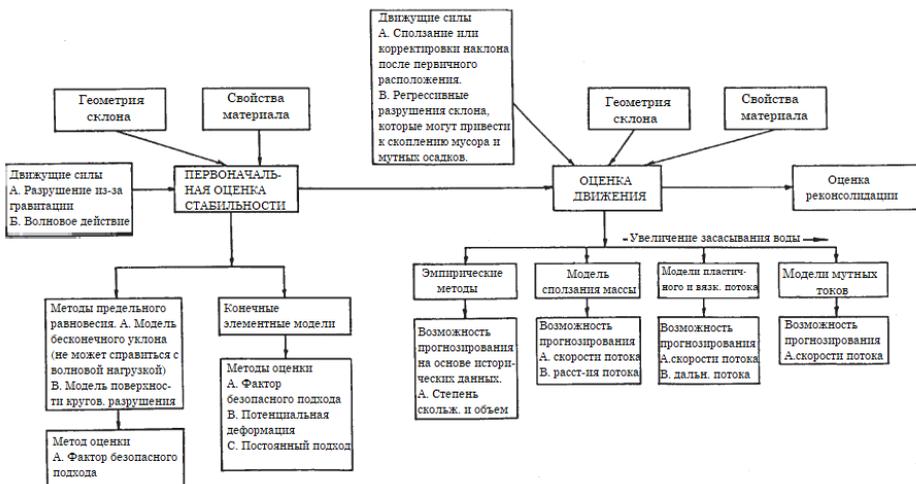


Рисунок 16.14. Процесс оценки морского склона (по Chaney, R. C. and Almagor, G. [2016], Seafloor Processes and Geotechnology, CRC Press, Boca Raton, FL, 558 p.).

16.11.2.1. Остаточные почвы

Для регионов с остаточными почвами Binnie и Partners (1971) и Chiang (1979) предлагают следующие контрольные процедуры.

1. При проектировании используются эффективные параметры прочности на сдвиг c и 0 .

2. Предполагается, что отрицательное давление в поровой воде полностью устраняется путем инфильтрации в неблагоприятных условиях участка в отношении осадков.

3. При проектировании выбор точки пересечения когезии c' осложняется чувствительностью параметра к выборке и обработке. Сокращение на 40–100 % результатов лабораторных испытаний или прогнозируемых значений из обратного расчета обычно принимается для анализа и проектирования.

4. Толщина полосы смачивания может быть оценена из уравнения 16.6 для конкретного участка склона и ливня вместе с данными об уровне грунтовых вод, полученными путем мониторинга стояков или пьезометров для оценки вероятного подъема фреатической поверхности.

5. Глубина трещины в ненасыщенных склонах и развитие гидростатического давления в трещинах также учитываются при анализе устойчивости.

6. Для профилей выветривания или реликтовых соединений методы анализа, предполагающие круговую поверхность разрушения, не считаются подходящими. Альтернативные методы, предполагающие обобщенные поверхности скольжения, считаются более пригодными.

7. Коэффициент безопасности для анализа устойчивости и типы резки указан в таблице 16.3.

16.11.2.2. Лесс и ил

Лессовые отложения имеют высокую проницаемость в вертикальном направлении, поскольку содержат сети взаимосвязанных каналов, образованных из разложившихся корней. Защита таких склонов от проникновения воды и эрозии предотвращает вертикальную перколяцию и разрыв связей между частицами, который вызывает разрушение склонов.

16.11.2.3. Трещиноватые глины и сланцы

Разрушения склона из глин и сланцев с жесткими трещинами могут происходить постепенно в течение длительного периода времени, поскольку они подвергаются очень большим сдвиговым смещениям. Когда эти смещения превышают сдвиговое смещение, соответствующее пиковой прочности, сопротивление сдвигу уменьшается до остаточной величины, хотя в некоторых случаях эти почвы могут иметь устойчивые наклоны под более крутыми углами.

Таблица 16.3. Контрольно-измерительные приборы для контроля уклона и движения грунта.

Инструмент	Измеримые параметры
Короткий электрод	Поверхностное движение
Наклономер	Уклон
Инclinометр	Горизонтальное движение почвенной массы
Скважинный экстензометр	Движение внутри грунтовой массы
Индикатор полосы сдвига	Поверхность скольжения
Пьезометр	Поровое давление воды
Система предупреждения о скольжении	
Индикатор интенсивности растрескивания	Степень раскрытия и глубина трещины
Акустическая эмиссия	Измерение деформации и степени напряжения звуковыми волнами
Сейсморазведка	Измеряется разрывность подземных слоев

16.11.3. Тропический климат – землетрясение – городская среда

В таблице 16.3 приведены некоторые инструменты для измерения движения склона, которые также могут использоваться в качестве системы предупреждения для снижения ущерба от оползней. Ниже приведены некоторые рекомендации для контроля оползней в сейсмоопасных тропических районах с городской средой и коррекции грунтов.

1. Подготовьте карты оползнево-сейсмического районирования и микрорайонирования (раздел 16.14) для данного района, особенно для городской местности.

2. Обеспечьте соблюдение строительных норм и правил безопасности государственными органами.

3. Минимизируйте сокращение склонов, чтобы уменьшить риск создания неустойчивого склона.

4. Должны быть установлены как поверхностные, так и подземные дренажные системы, отводящие всю поверхностную воду от зон потенциального разрушения. Регулярно осматривайте дренажную систему.

5. Должны быть установлены системы предупреждения об оползнях или контрольно-измерительные приборы.

16.12. ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ОПОЛЗНЕЙ И ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ДЕЙСТВИЙ

16.12.1. Общее обсуждение

Для контроля оползня или исправления его последствий доступны несколько методов, таких как геометрический, гидрологический, физико-химический и механический, как показано в таблице 16.4. Для определенного оползня или потенциального оползня редко существует один и только один метод восстановления. В целом, наиболее экономически эффективные средства профилактики состоят из комбинации двух или более методов, ранее

упоминавшихся и перечисленных в таблице 16.4. Предложены два подхода для решения проблем оползней: (1) генетический подход для диагностики причин оползней и (2) инфраструктурные меры для исправления положения.

Таблица 16.4. Некоторые методы, обычно используемые для контроля оползней.

Методы	Процедуры
Геометрический метод	Выровнять склоны Создать насыпи
Гидрологический метод	Поверхностный дренаж Песочные стоки Канализационные трубы Горизонтальные стоки
Механический метод	Механическое уплотнение Сборная железобетонная сетка Болты и якорь Зуб плотины Армированная земля Известковый столб Корневые сваи
Физико-химический метод	Химическая инъекция или цементация Стабилизация извести Цементная стабилизация Стабилизация асфальта

16.12.2. Генетический диагностический подход

Во многих случаях из-за сложного геологического залегания и очень неоднородных слоев почвы чрезвычайно трудно анализировать устойчивость склона с помощью традиционного подхода, например, предельного равновесия или предельного анализа, как обсуждалось в разделе 16.4. В таких случаях может быть полезен генетический подход. Генетический подход представляет собой систему, основанную на характеристиках геологического залегания, на истории напряжений и характере состава, а не на предположении, что почва однородна с равномерным распределением давления в поровой воде во всем слое. Пример подхода генетической диагностики дан в разделе 17.7.

16.12.3. Инфраструктурные мероприятия

С признанием этой проблемы возрос общественный и институциональный интерес к различным вопросам инфраструктуры, связанным с оползнями. Внутривидовые действия включают в себя инфраструктурные системы и компоненты. Есть множество доступных систем и компонентов, однако в этом разделе обсуждаются два типа инфраструктурных систем контроля оползней, а именно: корневидная свая (Root Pile®) и бамбуково-известковые композитные сваи. Краткое обсуждение корневидной сваи и бамбуково-известковых свай представлено далее.

16.12.3.1. Корневидная свая (Root Pile®)

Существуют различные типы свайных оснований, которые можно использовать для укрепления грунта и предотвращения оползней. Корневидная свая является очень универсальным строительным инструментом, который пригоден для индивидуального использования во многих различных ситуациях, а также в кластерах или в сетевых структурах решетчатого типа, известных под торговым названием удерживающих структур Fonedile Reticulated Root Piles®. Двумя важными применениями сетчатых конструкций являются (1) предупреждение оползня и (2) стабилизация грунта рядом с большими раскопками. Сообщалось о нескольких оползневых стабилизациях с помощью Reticulated Root Piles®. На рисунке 16.15 показаны оползни Монессена в Пенсильвании (Аурилио, 1983); на другом мост на автостраде 55 города Джексон, штат Миссисипи, и оползень на Шоссе 7 Мендосино, Калифорния.

16.12.3.2. Бамбуково-известковые композитные сваи

Композитные сваи из бамбука и известки – это недорогая система контроля оползней, используемая в качестве вертикального элемента (сваи) для предотвращения движения грунта или для поддержки конструкций и контроля оползней, см. рисунок 16.16. Весь бамбук, используемый в инженерных целях, должен быть выдержан. Бамбук доступен различной толщины и длины; следовательно, мощность и размер, относящиеся к предельным нагрузкам, должны быть заранее определены до начала проекта. Для контроля оползней длина бамбуковой сваи должна быть больше, чем теоретическая плоскость разрушения. Эта теоретическая плоскость разрушения может быть оценена с помощью обычного анализа устойчивости склона. Расстояние между бамбуковыми ворсами примерно в восемь–десять раз больше диаметра бамбуково-известкового композитного элемента. Для укрепления новой насыпи или небольших земляных плотин эффективны горизонтальные типы бамбуковых матов или полос. Бамбуково-известковая система также может быть использована в качестве якорной, натяжной или корневой сваи, как обсуждалось в предыдущем разделе. Принцип бамбукового фиксатора такой же, как и у бамбуковой сваи с применением обратной нагрузки. Подробное обсуждение и процедуры установки *in situ* см. в работе Fang (1991c).

Nashim и Ang (1996) реализовали многопрофильную исследовательскую программу с участием подгрупп гидрологов, геологов, климатологов, ботаников, специалистов в области механики почв и дорожного покрытия. Они описывают методику, разработанную для количественной оценки безопасности склоновых систем, включающую различные факторы, влияющие на безопасность склонов. Основное применение методика нашла на склонах вдоль шоссе, однако метод может использоваться и в другом месте, если надлежащие местные факторы окружающей среды изменены.

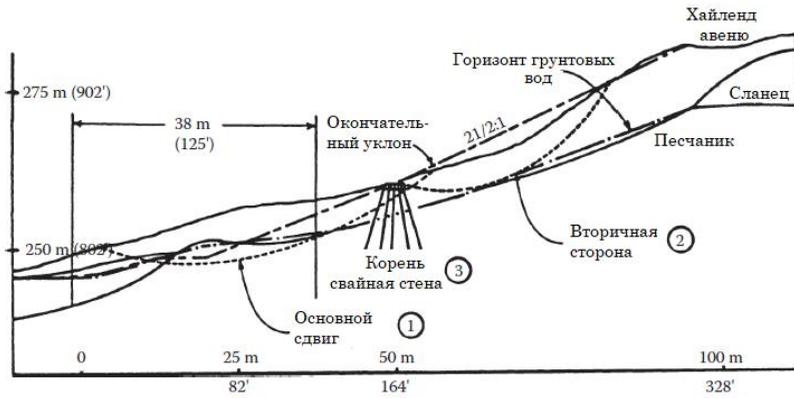


Рисунок 16.15. Корневидные сваи для контроля оползня, Монессен, Пенсильвания: (сверху) корневидные сваи – вид спереди; (внизу) корневидные сваи крупным планом. (Фото любезно предоставил доктором U. Dash, Департамент транспорта Пенсильвании.)

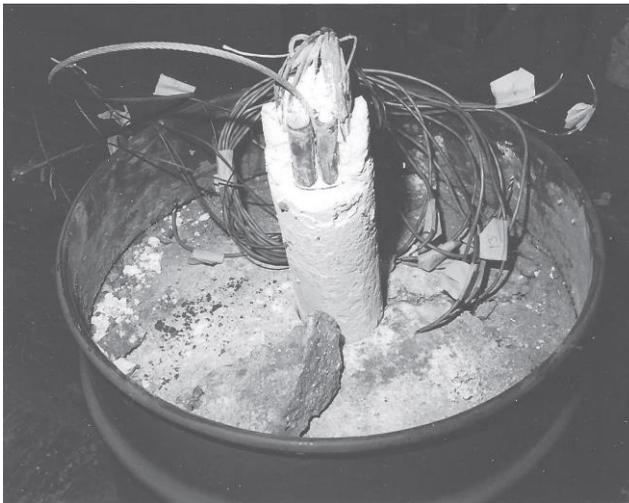


Рисунок 16.16. Бамбуково-известковые композитные сваи.

16.13. РАЙОНИРОВАНИЕ И МИКРОРАЙОНИРОВАНИЕ ОПОЛЗНЕЙ

16.13.1. Районирование и микрорайонирование

Зонирование для оползневых воздействий использовалось для планирования и проектирования различных зданий, сооружений, удерживающих землю, плотин и насыпей шоссе (Dobrovolny и Schmoll, 1976). Идея зонирования оползня аналогична сейсмическому районированию и микрозонированию, которые служат руководством для более безопасного землепользования и строительства. Оползнево-сейсмическое районирование и микрозонирование должны быть подготовлены одновременно. Они также должны быть подготовлены в сочетании с геологическими и материальными картами. Карты районирования оползня включают в себя следующую информацию.

1. Почвенно-геологические данные.
2. Характеристики сейсмичности.
3. Особенности эрозии.
4. Дренажные системы.
5. Потенциал движения почвы.
6. Оползневый потенциал.
7. Степень уклона.
8. Процент уклона и др.

Основным критерием определения нестабильности является степень уклона, участки с крутым и очень крутым уклоном, которые будут главными участками нестабильности. Кроме того, степень нестабильности зависит от геологических или строительных материалов, лежащих в основе склона. Экологические факторы, такие как осадки, сезонные изменения и участки с повышенной влажностью, также должны учитываться при подготовке зонирования оползней.

Таблица 16.5. Описание единиц картирования для карты устойчивости естественных склонов.

Единица картирования	Устойчивость склона	Потенциал оползня	Потенциал движения почвы	Склоны (%)	Геология
1	Высокая	Очень низкий	Очень низкий	<45	Недифференцированная
2	Умеренно высокая	В целом низкий	В целом низкий	45–100	В целом стабильная порода
3	Умеренная	От умеренно низкого до умеренно высокого	Умеренно низкий	45–100	От среднего до крупнозернистого неконсолидированного отложения
4	Умеренно низкая	От умеренно низкого до умеренно высокого	Высокий	45–100	Мягкая, морозоустойчивая порода, преимущественно аргиллит
5	Низкая	Умеренно высокий	Высокий (главным образом камнепады и снежные лавины)	Обычно > 100	Коренные породы сломаны и частично разрушены
6	Очень низкая	Высокий	Высокий (главным образом осадки и земляные потоки)	15 → 100	Неконсолидированные отложения, покрытые чувствительной глиной и илом или включающие лед

Источник: по Dobrovolny, E. and Schmoll, H. R. (1976), Focus on Environmental Geology, Oxford University Press, New York, pp. 11–27.

16.13.2. Карта оползневого зонирования и микрозонирования

На основе информации, полученной, как указано в таблице 16.5, была разработана карта зонирования для устойчивости склона, как показано на рисунке 16.16. Также были разработаны подобные методы для картирования потенциальных оползней в городских и лесных районах. Эти карты зонирования предназначены в первую очередь для определения тех областей, в которых можно ожидать определенные проблемы, и для определения соответствующих характеристик площадки, чтобы, учтя их при проектировании, минимизировать ущерб до приемлемых уровней в случае разрушительной катастрофы.

16.14. РЕЗЮМЕ

1. Стабильность земляных склонов и оползней принадлежат (или: относятся к) одной системе. Оползень является результатом неустойчивости склонов. Разрушение склонов не происходит одновременно. Оно происходит постепенно. Сопутствующие явления до оползня включают растрескивание поверхности земли, усадку, эрозию и ползучесть, которые приводят к скольжению поверхности, чрезмерному оседанию и, наконец, оползню.

2. Дождь – основной фактор для возникновения оползней в тропических регионах. Механизм взаимодействия почвы и воды, связанный с прогрессирующим разрушением склона, имеет важное значение.

3. Растрескивание грунта, его разрушение и растяжение напрямую связаны с разрушением склона. Эффект влагосодержания, определенный в лабораторных исследованиях, показывает, что предел прочности при растяжении более чувствителен, чем обычные параметры сдвига, такие как сцепление, угол трения и неограниченная прочность на сжатие. Предлагается использовать предел прочности на разрыв в качестве критерия для измерения разрушения склона.

4. Оползни, вызванные землетрясениями, наносят нам больший ущерб, чем оползни, возникшие по другим причинам, поэтому оползнево-сейсмическое районирование и микрорайонирование являются полезным инструментом, служащим руководством для более безопасного землепользования и строительства. Тем не менее значение вероятности оползневого и сейсмического ущерба (или комбинации этих двух элементов) должно быть дополнительно оценено для практического использования в инженерных целях.

5. При анализе нестабильности склона важны процедуры или методы выбора подходящих параметров прочности.

6. Для контроля и исправления последствий оползней требуются большие объемы строительных материалов. Использование местного материала и экономический анализ должны быть тщательно изучены.

ПРОБЛЕМАТИКА

16.1. Какова связь между устойчивостью склона и оползнем?

16.2. Опишите некоторые явления на этапе до оползневого разрушения.

16.3. Вы были назначены консультантом Департамента транспорта в зоне с умеренным климатом. Ваше первое задание – исследовать два разрушения на склонах и предложить меры для их исправления. Одно из разрушений произошло в заливе на крутом склоне, в то время как второе затронуло соседний разрез, сделанный под крутым углом через глинистый материал.

а. Подробно опишите шаги, которые вы предпримете во время исследования каждого места, с обоснованием каждого шага.

б. Предложите по крайней мере две возможные корректирующие меры для каждого случая, которые могут быть применимы в зависимости от результатов вашего исследования. Объясните каждое корректирующее действие, которое вы предлагаете.

16.4. Почему кислотный дождь и/или кислотный дренаж вызывают оползень сильнее, чем обычный дождь?

16.5. Почему и как ионный обмен в почве вызовет нестабильность склонов?

16.6. Что такое так называемая ошибка первого склона? Почему разрушение склона происходит неожиданно в чрезмерно уплотненных почвенных отложениях?

16.7. Каковы основные различия между предельным равновесием и предельным анализом для оценки устойчивости склона?

16.8. При решении проблем устойчивости склона в сильно связанных грунтах трещина растяжения обычно развивается на некотором расстоянии от вершины склона. Как бы вы определили глубину такой трещины и как она влияет на анализ устойчивости склона?

17. Контроль твердых и жидких отходов и их утилизация

17.1. ВВЕДЕНИЕ

17.1.1. Общее обсуждение

В этой главе обсуждаются две основные проблемы, связанные с твердыми и жидкими отходами: во-первых, как контролировать твердые и жидкие отходы; во-вторых, как восстановить и повторно использовать эти отходы в качестве обычных строительных материалов, если это возможно. Все отходы, обсуждаемые в данной главе, представляют собой городской мусор, обычно известный как бытовой мусор. Мы сосредоточим внимание на пяти аспектах: (1) основные характеристики городского мусора, включая его состав, классификацию и технические характеристики, такие как изменение объема, гидравлическая проводимость, несущая способность и отношение напряжение–деформация–прочность уплотненного мусора; (2) процессы разложения мусора на свалке, включая причины, механизмы и прогноз оседания; (3) контроль уплотнения в процессе захоронения и устойчивость склона на полигоне (как на вновь созданных, так и на заброшенных полигонах); (4) проектирование средств защиты объектов с отходами; (5) переработка отходов и их использование в качестве обычных строительных материалов.

Существует несколько способов утилизации мусора: его использование в качестве заменителя строительных материалов; изготовление строительных блоков; сжигание или просто вывалка в землю. Сброс на свалку – самый простой способ избавиться от нежелательного мусора. Мусор на свалке можно сгруппировать в три основные категории: (1) быстро разлагаемый материал, (2) медленно разлагаемый материал и (3) относительно неразлагаемый материал. В последнее время из-за максимизации использования земли некоторые из существующих заброшенных полигонов используются как часть автомобильных дорог, парков отдыха, а также торговых центров и промышленных объектов. Используя такие участки для обычного строительства, застройщики должны принять надлежащие меры предосторожности.

17.1.2. Устойчивость городского мусора на полигоне

17.1.2.1. Устойчивость свежего мусора

Материал на свалке проходит три стадии: (1) какое-то время свежий мусор будет оставаться на свалке в стабильном состоянии; (2) с течением времени некоторые разлагаемые отходы постепенно разложатся (если это произойдет, то важен механизм процессов разложения); (3) нахождение отходов в конечном стабильном состоянии.

17.1.2.2. Стабильность заброшенного полигона

Заброшенная свалка, как определил Фонд экологических исследований Пенсильвании (PERF, 1982), представляет собой одно из хранилищ неактивных опасных отходов. Конкретного владельца этой свалки либо невозможно установить, либо известно, что он обанкротился и, следовательно, не может позволить себе оплатить необходимые работы. Либо речь идет о месте, где произошел незаконный сброс. Заброшенный полигон – это пустошь. В прошлом такие объекты не рассматривались как места для какого-либо использования, но сейчас рассматриваются. Поэтому необходимо тщательно пересмотреть дополнительные проблемы, такие как несущая способность, оседание, устойчивость склона и т. д. (Dunn, 1995; Jefferis, 1995).

17.1.3. Связь между твердыми и жидкими отходами

Все отходы могут быть разделены на твердые и жидкие. Большая часть твердых отходов – это городской мусор. Этот мусор будет разлагаться с течением времени и станет жидкостью, обычно называемой фильтратом. Согласно данным EPA США, около 90 % отходов, которые включают опасные промышленные отходы, находятся в жидкой форме. Поэтому контроль твердых и жидких отходов означает контроль только жидких отходов (Fang и Evans, 1994). Основное назначение всех типов систем контроля отходов заключается в контроле или предотвращении просачивания жидких отходов в незагрязненные зоны. Чтобы выполнить такую задачу, необходимо рассмотреть три основных вопроса.

1. Почему и как твердые отходы превращаются в жидкие отходы?

2. Каково поведение жидких отходов?

3. Как взаимодействуют отходы и системы контроля отходов (в основном глины)?

Понимание взаимодействия между поровыми флюидами (жидкие отходы) и глинами (система контроля отходов) требует знания экологических аспектов геотехнической инженерии. Это важно для инженерного использования природных материалов для локализации опасных и токсичных отходов. Без этих знаний о поведении глины в результате действия на нее опасных отходов любой проект инженерных систем, например, программы корректирующих действий, не может иметь надежной основы для прогнозирования долгосрочного поведения этой системы.

Средства контроля твердых и жидких отходов также представляют собой сложную систему; они нуждаются в междисциплинарных знаниях из геотехнических, гидрогеологических и экологических областей для анализа, проектирования и создания систем локализации отходов. Обычные пассивные гидравлические барьеры часто используются в качестве барьеров для локализации отходов, однако для устранения этих препятствий необходимы особые соображения. В этой главе обсуждение будет сосредоточено на следующих моментах.

1. Характеристика городского мусора, включая процессы разложения и механизм загрязнения.

2. Основные соображения по анализу и проектированию систем управления.
3. Методы контроля отходов.
4. Меры предосторожности и защита для этих средств контроля.

17.2. ХАРАКТЕРИСТИКА ГОРОДСКИХ ОТХОДОВ (МУСОРА)

17.2.1. Разлагаемый мусор

Отходы (мусор) состоят из чего-либо, что не может быть в дальнейшем использовано или переработано (это может быть экономически нецелесообразно). Таким образом, его состав варьируется от страны к стране, от сообщества к сообществу, а также от сезона к сезону. Плотность варьируется от 50 до 400 рсф в зависимости от количества металла и лома. В таблице 17.1 приведен средний состав твердых отходов на основе результатов национального обследования городов Нью-Йорк (США) и Осака (Япония) (Ямамура, 1983). В конечном итоге эти отходы были сброшены на свалку. Излишне говорить, что некоторые промышленные отходы очень опасны и токсичны.

17.2.2. Техническая классификация мусора

Как правило, существуют две группы мусора: разлагаемые и относительно неразлагаемые материалы. В таблице 17.2 представлена классификация мусора. Среди разлагаемых отходов некоторые являются опасными и токсичными, а некоторые нет. Существуют различные состояния вещества (твердое, жидкое и газообразное), как показано на рисунке 2.8, в зависимости от условий окружающей среды на свалке. Многие отходы при смешивании с другими отходами или материалами на объекте с опасными отходами могут оказывать вредное воздействие на здоровье человека и окружающую среду. Могут происходить пожары и взрывы, бурные реакции, выделяться токсичная пыль, туман, газы или легковоспламеняющиеся вещества (пары или газ) – подробный список был подготовлен Агентством по охране окружающей среды США (1990). Характеристики опасных отходов, включенных в Список ЕРА 1990 года, представлены в таблице 17.3. Все утилизаторы отходов должны определить, являются ли отходы опасными, одним из трех способов.

1. Это либо отходы, либо отработанные материалы, которые по определению являются опасными и содержатся в определенных списках (таких как списки ЕРА США).

2. Они обладают одной из четырех опасных характеристик, таких как воспламеняемость, реакционная способность, коррозионная активность и токсичность.

3. Радиоактивные отходы не подпадают под действие Закона о сохранении и восстановлении ресурсов (RCRA) или Закона 97. Они конкретно контролируются Законом об атомной энергии США и P.L 807 и 1380, как описано в разделе 10.8.

Таблица 17.1. Средний состав твердых отходов.

Тип	Нью-Йорк (1968)	США, Национальный (1973)	Кавасаки, Япония (1979)	Осака, Япония (1980)
Бумага	58,8	51,6	35,3	37,1
Пищевые отходы	9,2	19,3	13,5	13,2
Металл	7,6	10,2	7,5	5,5
Стекло	8,6	9,9	19,6	12,3
Древесина	2,5	3,0	3,6	2,5
Текстиль	0,8	2,7	3,0	4,0
Резина, кожа	0,8	1,9	0,5	0,3
Пластик	0,8	1,4	9,7	15,2
Садовые отходы	10,1	–	2,9	2,5

Источник: данные из: Remson, I., et al. (1968), J. Sanitary Eng. Div. Proc. ASCE, v. 94, n. SA2; Sowers, G. F. (1973), Proc. 9th ICSMFE, v. 4, pp. 297–310; Yamamura, K. (1983), Waste Manage. Res., v. 1, pp. 1–15.

Таблица 17.2. Инженерная классификация мусора.

Категории	Типы	Описание	Инженерное поведение
Свежий мусор			
Быстро разлагаемый мусор			
A-I	Кухонный мусор	Растительные пищевые отходы; мясные отходы; жиры; цитрусовые очистки	Вес блока варьируется
A-II	Садовый мусор	Древесная стружка и кора; листья и корни деревьев; цветы и садовые растения; газонная трава; вечнозеленые растения и кустарники	Плохие запахи
A-III	Мертвые животные и навоз	Мертвые животные и птицы; навоз; масла и краски	
A-IV	Бумага и бумажные изделия	Картон; газеты; почта; журналы; бумажные коробки от пищи; бумажные салфетки; вощеная бумага; бумага с пластиковым покрытием; различные сумки	Возможность возгорания
Медленно разлагаемый мусор			
B-I	Текстиль, игрушки, коврики	Текстиль; ковры; одежда; туфли	
B-II	Стекло, керамика	Бутылки от безалкогольных напитков и пива; битое стекло и посуда	
B-III	Пластмасса, резина, кожа	Пластиковые пакеты; резиновые шины; ковры; кожаные изделия	
Относительный неразлагаемый мусор			
C-I	Металлы, бытовая техника	Различные металлы; электроприборы; заброшенные детали автомобиля	200–400 pcf
C-II	Снос и строительные материалы	Разбитые камни, кирпичи, стены, бетонные, асфальтовые и песчано-гравийные покрытия	110–150 pcf
C-III	Почвы	Почвы; пыль, зола, отходы из пылесоса	100–135 pcf
Разложившийся мусор			
D-I	Частично разложившийся мусор	Органическая почва, содержащая некоторые стеклянные или металлические изделия	85–120 pcf
D-II	Разложившийся мусор	Органические почвы, содержащие немного песка	100–135 pcf

Источник: основано на данных: Fang, H. Y. (1995a), GREEN'93, U. K., Waste Disposal by Landfill, R. W. Sarsby, ed., A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 47–72.

17.2.3. Рециклирование и рекуперация энергии из отходов

Рециклирование – это процесс, при котором выброшенные материалы и предметы используются в оригинальной или измененной форме, а не утилизируются, отправляя материал обратно в процесс, в котором он был впервые сформирован. Недавно в США была разработана успешная программа утилизации и получения энергии из отходов. Алюминиевые банки, пластиковые контейнеры и использованная бумага были переработаны и использованы повторно. Тяжелые металлы, такие как свинец (Pb), ртуть (Hg) и цинк (Zn), захваченные в грунтовой почве или в местах захоронения отходов, были извлечены с использованием электрокинетических и электромагнитных процессов (раздел 9.10) в рамках программ дезактивации почвы и восстановления энергии. Таким образом, состав свалочного материала изменился с начала этой программы.

17.2.4. Инженерные проблемы полигонов

Есть два вида основных проблем проектирования полигонов, которые требуют инженерных знаний.

1. *Во время периода удаления отходов:* проблемы относящиеся к уплотнению, дренажным системам, устойчивости откосов на свалках, а также подкладкам или гидравлическим барьерам.

2. *Утилизация отходов:* существует два вида утилизации. Первый – использование отходов в качестве обычного строительного материала; сюда, например, относятся отходы шин, используемые в качестве легких бетонных заполнителей. Второй – использование старых заброшенных свалок в качестве жилищных проектов. В таких случаях характеристики инженерного поведения отходов должны быть известны. Некоторые основные элементы или факторы, которые следует учитывать при анализе и проектировании систем контроля отходов, приведены на рисунке 17.1.

Среди этих факторов, относящихся к мерам по обеспечению устойчивости и безопасности захоронения отходов, контроль уплотнения во время процесса утилизации мусора и устойчивость склона на свалке во время и после строительства являются наиболее важными с инженерной точки зрения. Дальнейшие обсуждения этих аспектов представлены ниже.

Таблица 17.3. Характеристика опасных отходов.

Воспламеняемость

Твердые отходы проявляют свойство воспламеняемости, если они существуют в любой из следующих форм.

- Жидкость, отличная от водного раствора, содержащая менее 24 % спирта по объему, с температурой вспышки ниже 60°C.
- Неликвид, который в стандартных условиях способен вызывать пожар вследствие трения, поглощения влаги или самопроизвольных химических изменений, а также при воспламенении таким образом, что это создает опасность.
- Воспламеняемый сжатый газ.
- Окислитель, такой как перманганат, неорганическая перекись или нитрат.

Реактивность

Твердые отходы проявляют реакционные свойства, если они:

- обычно нестабильны и легко подвергаются принудительным изменениям без детонации;
- бурно реагируют с водой или образуют с ней потенциально взрывоопасные смеси;
- образуют при смешивании с водой токсичные газы или пары;
- являются цианидными или сульфидсодержащими, образующими токсичные газы или пары.

Коррозионная активность

Твердые отходы обладают коррозионной активностью, если они:

- являются водными и имеют рН, меньший или равный 2 или больший или равный 12,5;
- являются жидкостью и корродируют сталь со скоростью более 6,35 мм/год при температуре испытания 55°C.

Токсичность

Твердые отходы обладают такими характеристиками токсичности, как мышьяк, кадмий, четыреххлористый углерод, свинец, ртуть, селен, серебро и т. д.

Источник: взято из списка ЕРА США за 1990 год.

17.3. ПРЕССОВАНИЕ ОТХОДОВ

17.3.1. Общее обсуждение

Когда мусор ежедневно доставляется на грузовиках и сбрасывается на свалки, это так называемый старомодный подход к удалению отходов. В некоторых случаях этот мусор распределяется в более тонкий слой, смешивается с небольшим количеством земного материала и уплотняется обычным оборудованием для уплотнения с целью прикрытия непривлекательного места захоронения отходов, минимизации запаха или предотвращения вандализма животных и птиц. В настоящее время не существует стандартного правила или регламента о том, как мусор должен быть сброшен или уплотнен. В этом разделе предлагаются сведения о возможном контроле над уплотнением отходов в местах их захоронения и об анализе прошлого опыта.



Рисунок 17.1. Некоторые основные элементы или факторы, которые следует учитывать в системах контроля отходов.

17.3.2. Обзор санитарных полигонов

Обычный процесс уплотнения обсуждался в разделе 11.2. В месте захоронения отходов правильное уплотнение может снизить потенциальную опасность пожара на свалке. Чем меньше воздуха попадает на свалку, тем меньше вероятность возникновения пожара. В начале 1970-х гг. в штатах Нью-Йорк (Moore и McGrath, 1970) и Калифорнии (Chang и Hannon, 1976) было создано несколько испытательных участков на полигонах. Испытания, выполненные в Калифорнии, являются наиболее полными. Их краткое обсуждение представлено ниже.

Площадка для испытаний была расположена на предложенном маршруте 52 в округе Сан-Диего, штат Калифорния. Это в пределах санитарного узла города Сан-Диего, доступного с улицы Меркурий к северу от бульвара Клермонт-Меса. Отходы, в том числе стекло, дерево, кухонный мусор, бумага, тряпки, металлы и т. д., были свалены в этом районе в период между 1964 и 1967 годами и покрыты

тонким слоем земли. В этом районе выпадает всего около 10 дюймов осадков в год, и происходит лишь небольшое разложение, за исключением пищевых или растительных отходов. На основании этого опыта были получены следующие положительные результаты.

1. 50-тонный каток можно использовать для сжатия материала фундамента, состоящего из сухой или ненасыщенной санитарной свалки, для уменьшения общего первичного осаднения. Максимальное расчетное значение при предварительной прокатке было достигнуто после 25 проходов 50-тонного катка, что составляет 85 % максимального расчетного значения при предварительной прокатке, полученного при 10 проходах 50-тонного катка.

2. Перегрузка имеет большое значение в ускорении консолидации санитарной свалки. Расчетная скорость значительно выросла, когда была достигнута максимальная высота в 10 футов; 50-процентное дополнительное оседание произошло до завершения строительства насыпи, а 80-процентное произошло через 30 дней после завершения строительства насыпи.

17.3.3. Процесс уплотнения поверхности

Процесс уплотнения поверхности играет важную роль для стабилизации полигона. Тем не менее это требует планирования во время процесса удаления отходов. Ниже приведены некоторые графически представленные предложения (рисунок 17.2) и комментарии, которые сделал Fang (1995a).

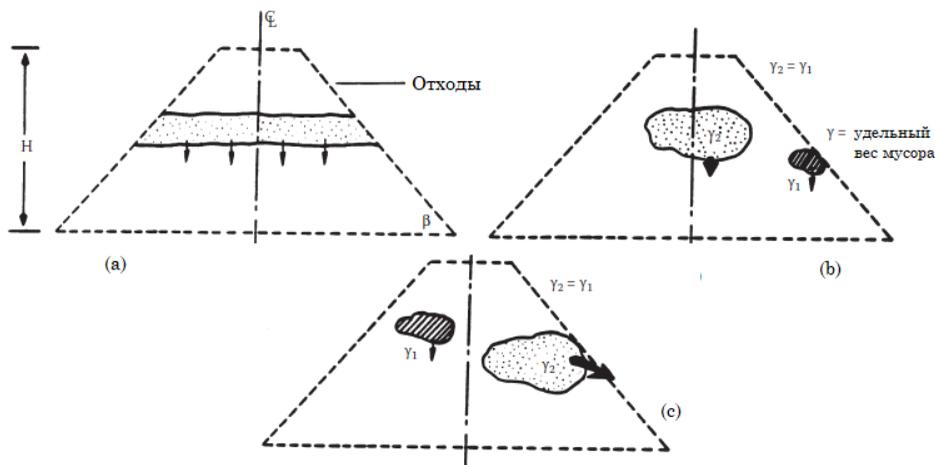


Рисунок 17.2. Влияние процедуры вывоза мусора на устойчивость склонов полигона: (а) равномерный сброс: равномерное оседание – устойчивый уклон; (б) нерегулярный сброс: (случай I); неравномерная осадка – относительно устойчивый уклон; (с) нерегулярный сброс (случай II); неравномерная осадка – неустойчивый уклон.

1. Мусор бывает различных видов и не может быть равномерно распределен на свалке. Однако в пределах нее он должен равномерно распределяться внутри слоя (рисунок 17.2a).

2. В противном случае более тяжелые предметы следует сбрасывать ближе к центру свалки с целью контроля стабильности засыпки (рисунок. 17.2b) и избегать сброса по краям свалки (рисунок 17.2c).

3. Разложить только что выровненный мусор нужно как можно тоньше. Поскольку мусор является нестабильным материалом, он требует стабилизации, чтобы уменьшить чрезмерное оседание. Нужно смешать доступную почву с мусором или добавить зольную пыль, известь или другие вещества в качестве стабилизирующего материала.

4. Можно использовать тяжелую прокатку, например, 50-тонный каток. Вес катка связан с толщиной слоев мусорной свалки. Теоретически, чем тяжелее каток, тем выше устойчивость мусорной свалки. В некоторых случаях использование динамической консолидации для контроля уплотнения на свалках недавно стало обычной практикой.

17.3.4. Глубинное уплотнение на полигонах

Традиционные методы уплотнения, используемые в местах захоронения отходов, иногда дают неэффективные результаты для уплотнения сильно неоднородных материалов. Недавно для этой ситуации была использована динамическая консолидация с хорошими результатами (Inyang, 1992a). Эффективная глубина или глубина влияния важна для уплотнения свалок. Метод оценки эффективной глубины на полигоне и метод динамической консолидации показан на рисунке 11.3. Большинство конструктивных факторов, которые необходимо учитывать в проектах по тяжелому трамбованию, представлены в таблице 17.4. Численные диапазоны для соответствующих проектных параметров также предлагаются для использования в проектах, которые предусматривают контроль скорости миграции загрязнителей. Наиболее важным аспектом проектирования является выбор величин параметров ударной вязкости для соответствия условиям площадки и эффективного уплотнения грунта. Этот процесс выбора требует использования числового отношения, которое содержит такие параметры, как свойства материала (грунта), вес песта, размер песта, высота падения и глубина влияния каждого удара, как описано в разделе 11.4.

Для глубокого уплотнения полигона методы динамической консолидации обычно дают эффективные результаты. Однако необходимо внимательно следить за некоторыми побочными эффектами, такими как (1) вибрация, возникающая в результате динамического уплотнения, так как она может влиять на разжижение окружающих конструкций, и (2) сила трения, создаваемая вибрацией, поскольку она может создавать опасность пожара на полигоне.

Таблица 17.4. Числовые диапазоны конструктивных факторов тяжелой трамбовки для контроля скорости миграции загрязняющих веществ.

Фактор	Числовой диапазон	Комментарии
Требуемая глубина уплотнения (м)	< 12	Зависит от толщины рыхлого слоя
Прикладная энергия удара (т-м/м ²)	200–300	Применяемая энергия удара зависит от указанного изменения относительной плотности почвы
Диаметр трамбовки (м)	1,0–3,0	
Высота падения (м)	10–30	
Вес сбрасывания (т)	5–40	
Повторения (удары в точку)	2–8	Зависит от определенного улучшения относительной плотности
Расстояние между точками удара (м)	1,0–4,0	Зависит от желаемого перекрытия притоков
Минимальная глубина до уровня воды (м)	2,0–3,0	Для достижения этого условия может потребоваться временное обезвоживание
Требуемое улучшение относительной плотности (%)	> 40	Зависит от желаемого снижения проницаемости почвы
Пиковая скорость частиц на близлежащих структурах (см/с)	< 4,0	Должны быть оценены до полномасштабной реализации проекта

Источник: по Inyang, H. I. (1992a), Proc. HMC/Superfund'92, Hazardous Materials Control Resources Institute, pp. 626–630.

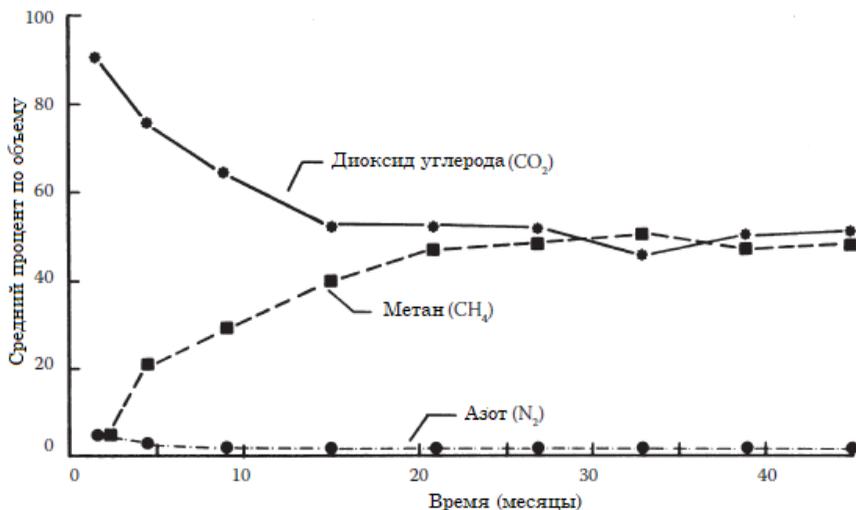


Рисунок 17.3. Распределение газа возле полигона (по NRC, [1977], Methane Generation from Human, Animal and Agricultural Wastes, NRC, Washington, D.C. Этот материал

является собственностью правительства США, но находится в открытом доступе и не подлежит защите авторских прав).

Существует несколько историй возникновения пожара в результате возгорания свалки из-за динамической консолидации, когда мусор на свалке находится в сухом состоянии, из-за большого количества газа (рисунок 17.3), образующегося в процессе разложения мусора.

17.3.5. Контроль уплотнения

В целом, контроль уплотнения в местах захоронения отходов не проводится, потому что основное намерение состоит в том, чтобы утилизировать отходы с простым отношением «кого это волнует?». Когда эти пустоши превращаются в используемые земли на более позднем этапе, часто выражается сожаление: «Мы должны были сделать это раньше, потому что мы не решили проблемы должным образом для текущего использования». Поэтому во время процесса утилизации отходов необходимо проводить предварительное планирование, чтобы избежать осложнений на более позднем этапе. Предлагаются два основных подхода: (1) применение методов улучшения (стабилизации) грунта и (2) контроль уплотнения с надлежащей фиксацией состава полигона, который необходимо поддерживать.

План выборочной проверки и отбора проб, описанный Hilf (1991), обычно используется в геотехнической инженерии. Его следует также использовать на участках захоронения отходов, чтобы снизить частоту отбора проб и оценить эффективность функционирования места захоронения *in situ*.

17.4. УСТОЙЧИВОСТЬ СКЛОНА МУСОРНОГО ПОЛИГОНА

17.4.1. Характеристика склонов на мусорном полигоне

Устойчивость склона на мусорном полигоне зависит от двух условий: первое – это условие заполнения, а второе – условие обрезки. В процессе утилизации отходов склоны полигона находятся на стадии формирования. Как высоко мусор может быть сложен, чтобы склон не разрушился? Важна критическая высота (H) склона (рисунок 17.2а). Когда заброшенный полигон должен использоваться в качестве строительной площадки, могут потребоваться земляные работы, тогда угол наклона (β) разреза будет важен. В общем, режимы разрушения откосов на полигонах аналогичны разрушениям на склонах. Типы разрушений также включают падения, опрокидывания и скольжения. Падения и опрокидывания происходят из-за отсутствия сцепления между двумя незакрепленными частями мусорной массы.

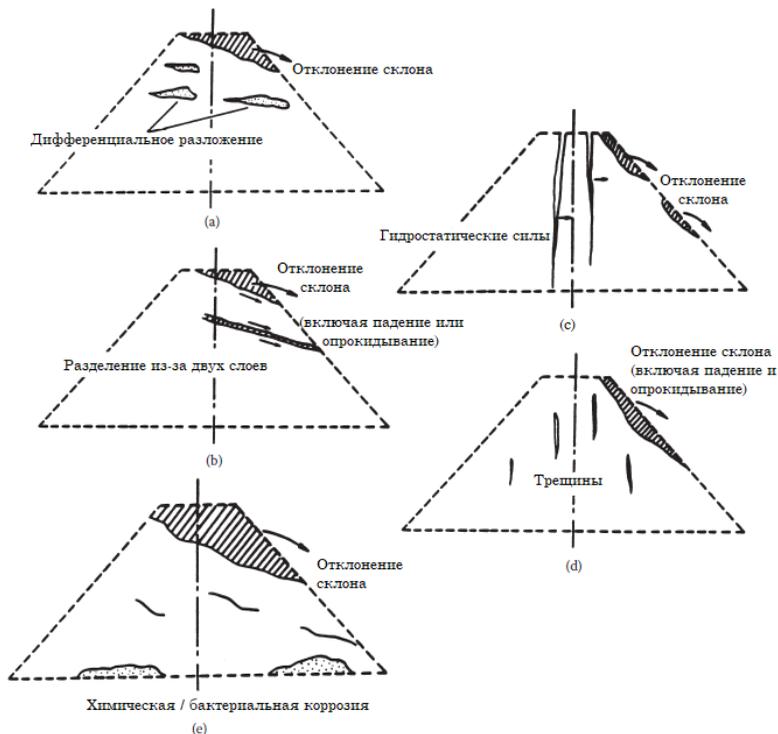


Рисунок 17.4. Режимы разрушения откосов на мусорных полигонах: (a) дифференциальное разложение из-за атмосферных воздействий, (b) отсутствие сцепления между двумя или большим количеством слоев, (c) гидростатические или экологические силы, действующие на разложенные или разрыхленные отходы, (d) дифференциальное разложение и дифференциальное оседание, вызывающее трещины на склоне и падение, (e) химическая коррозия разрушает опору и приводит к разрушению склона. Отходы разрушают опору. (По Fang, H. Y. [1995a], GREEN'93, U. K., Waste Disposal by Landfill, R. W. Sarsby, ed., A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 47–72. Перепечатано с разрешения H. Y. Fang.)

17.4.2. Механизмы разрушений на склоне

Потенциал разрушения склона напрямую связан с контролем уплотнения в процессе утилизации отходов. Чем лучше контроль уплотнения, тем меньше риск разрушений на склоне. На рисунке 17.4 показаны некоторые типичные причины разрушений на склонах полигона.

1. Дифференциальное разложение из-за выветривания (рисунок 17.4a).
2. Отсутствие сцепления между двумя или большим количеством слоев (рисунок 17.4b).
3. Гидростатическая сила или сила окружающей среды, действующая на разложившиеся или разрыхленные остатки мусора (рисунок 17.4c).
4. Дифференциальное разложение и дифференциальное оседание, приводящее к трещинам и падению склона (рисунок 17.4d).
5. Химическая и бактериальная коррозия некоторых поддерживаемых материалов разъедает опору и приводит к разрушению (рисунок 17.4e).

17.4.3. Анализ устойчивости склона

17.4.3.1. Текущая практика

Анализ устойчивости склонов мусорных плотин или полигонов для опасных отходов может потребовать использования мощной компьютерной программы. Chen (1986) сообщает об анализе места захоронения отходов для метрополии Тайбэй с помощью компьютерной программы STABLE II. Нарушение стабильности на санитарной свалке проанализированы Dvirnoff и Munion (1986) с использованием компьютерной программы SLOPE. В последнее время были разработаны различные подходы и более совершенные компьютерные программы. Современная практика сейсмического анализа и проектирования засыпок отходов описана в работах Seed и Bonaparte (1992), Inyang (1992b) и Ling и Leshchinsky (1996).

17.4.3.2. Генетический диагностический подход

Состав мусора на полигоне разнообразен, как обсуждалось в предыдущих разделах. Он не может быть обобщен как обычная геотехническая проблема, поэтому предлагается подход генетической диагностики (Fang, 1995a), который может помочь в понимании или решении проблем устойчивости склона на свалке. Общая система представлена на рисунке 17.5. Общие предлагаемые процедуры объясняются следующим образом.

1. Определить и охарактеризовать мусор.
2. Оценить характер мусора и инженерные свойства.
3. Изучите степень чувствительности к окружающей среде и потенциальному разложению.
4. Если это новый полигон, то необходимо вести надлежащие записи для будущего использования земли. Записи должны включать источники, типы, содержания, характеристики уплотнения и т. д.
5. Если это старый или заброшенный полигон и необходимые записи не делались, в таких случаях рекомендуется делать геологический разрез.
6. Другая информация включает в себя возраст отложений, толщину (или глубину), местные погодные условия, уровень грунтовых вод и т. д.

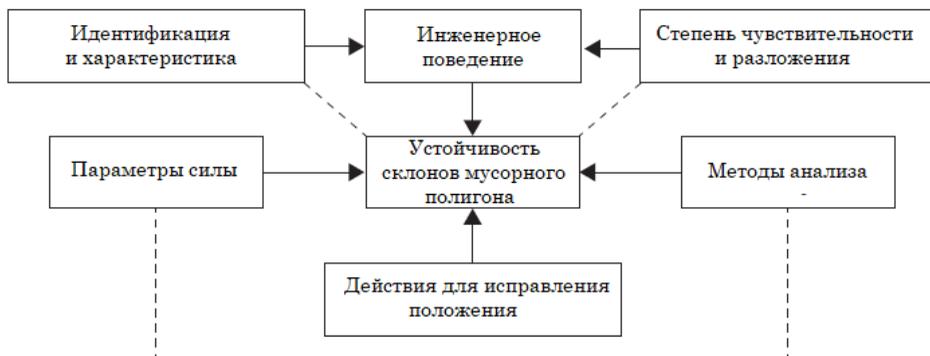


Рисунок 17.5. Устойчивость склона мусорного полигона (подход генетической диагностики).



Рисунок 17.6. Подготовленный лабораторией материал для удаления отходов для стабилизации почвы (слева направо: 100 %, 83 % и 75 % почвы по массе).

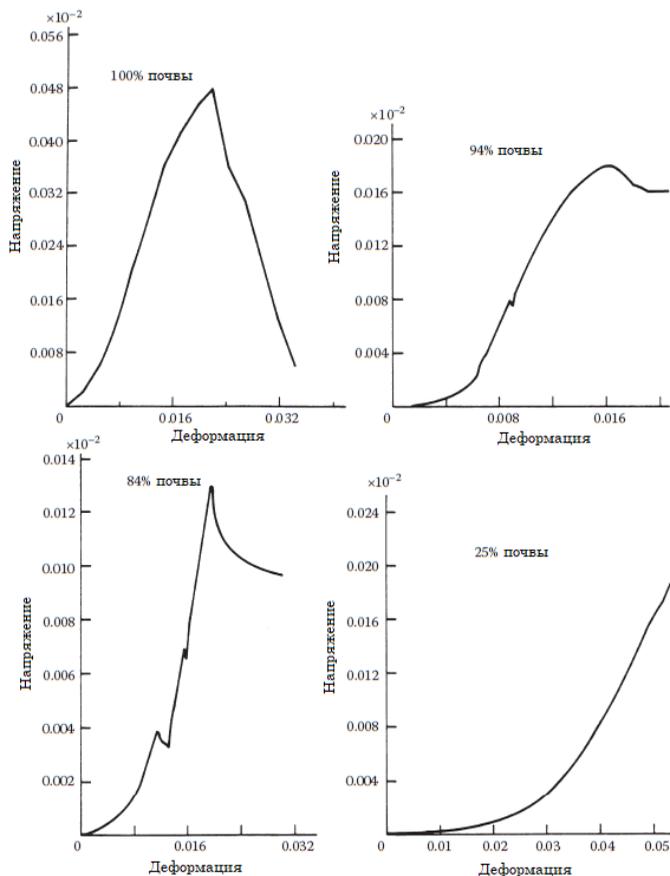


Рисунок 17.7. Напряженно-деформированные характеристики уплотненных мусорно-почвенных смесей, определенные в результате испытаний на растяжение (по Fang, H. Y. et al. [1976], *New Horizons in Construction Materials*, v. 1, Enviro Publishing, Bethlehem, PA, pp. 127–138. Перепечатано с разрешения Enviro Publishing, и Bethlehem, PA.)

17.5. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СПРЕССОВАННОГО МУСОРА

17.5.1. Характеристики напряжения, деформации, прочности

На рисунке 17.6 показаны фотографии подготовленного лабораторией материала для удаления отходов для стабилизации почвы (слева направо: 100 % почвы, 83 % почвы и 75 % почвы по весу). Цель этих экспериментов состояла в том, чтобы выяснить, в каком процентном соотношении материал для удаления отходов и почва должны быть смешаны для достижения оптимальных условий. Материал для удаления отходов состоял из тех компонентов, которые были определены в ходе национального обследования в пропорции (по весу), как показано в таблице 17.1 (с удалением пищевых отходов). В этом случае использовалась только прочность на растяжение (раздел 6.7). Образцы для испытаний были отлиты и спрессованы в стандартную форму Proctor. График на рисунке 17.7 показывает поведение нагрузки–деформации для образцов с содержанием почвы 100 %, 94 %, 84 % и 25 % по весу. Было обнаружено, что предел прочности при растяжении был увеличен для процентного содержания твердых отходов до 25 %. Для более высоких процентов твердых отходов предел прочности при растяжении уменьшался.

17.5.2. Параметры прочности и несущая способность

Чтобы использовать традиционный инженерно-геотехнический подход для оценки или прогнозирования инженерного поведения материала, например, несущей способности или устойчивости, необходимо иметь параметры прочности материала c и ϕ . К сожалению, определить c и ϕ для мусора с помощью обычного лабораторного подхода достаточно трудно. Однако для оценки этих параметров для уплотненного мусора был разработан сокращенный метод (Fang и соавторы, 1977; Fang, 1995a). Краткое описание представлено далее.

Предлагаемый метод основан на модифицированной огибающей Мора–Кулона–Чена–Друкера, как говорилось в разделе 11.7. Образцы, используемые для этого исследования, представляют собой уплотненные блоки природных отходов (тюки). Каждый тюк размером 4×4×5 футов был сформирован с трехмерными усилиями прессования, варьирующимися от 1300 до 0 фунтов на квадратный дюйм. Лабораторные испытания на сжатие и растяжение спрессованных тюков для утилизации природных отходов были проведены в Университете Лихай. Образцы для испытаний, использованные для этих исследований, были предоставлены компанией American Hoist and Derrick Co. На рисунке 17.8 показана типичная установка для испытания на сжатие. На рисунке 17.9 представлены кривые нагрузка–сжатие и нагрузка–проникновение. Затем угол сцепления и угол трения этих материалов можно рассчитать по уравнению 11.7, как описано в разделе 11.7, а несущую способность уплотненного мусорного блока можно оценить с помощью обычного уравнения несущей способности.



Рисунок 17.8. Типичная лабораторная установка для испытания на сжатие блока (тюка) уплотненного мусора.

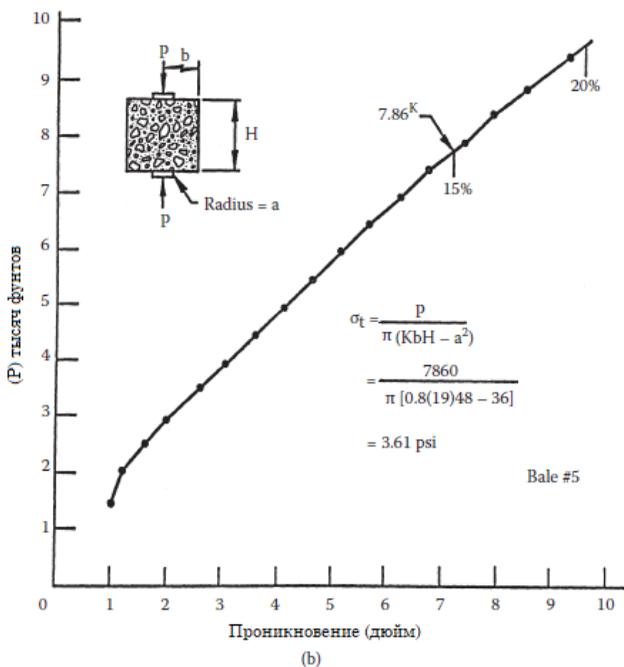
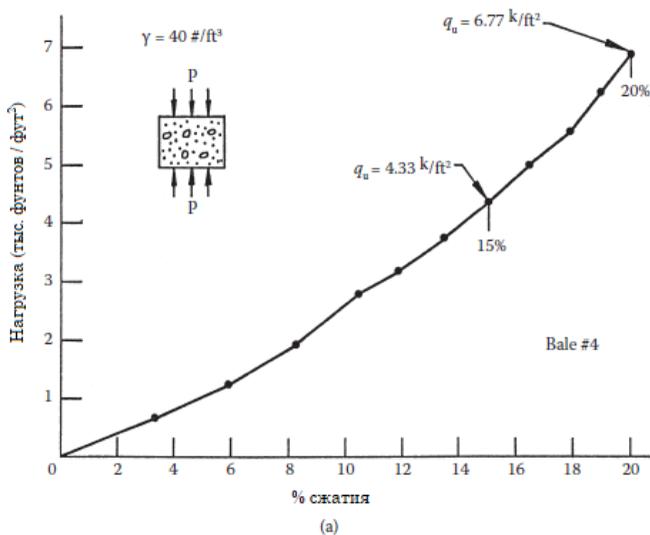


Рисунок 17.9. Кривая нагрузка–прогиб для уплотненного мусорного блока (тюка): (a) испытание на неограниченное сжатие и (b) испытание на растяжение (по Fang, H. Y. et al. [1977], Proc. Specialty Session of Geotechnical Engineering and Environmental Control, Z. C. Moh, ed. 9th ICSMFE, v. 1, pp. 265–278. Перепечатано с разрешения H. Y. Fang).

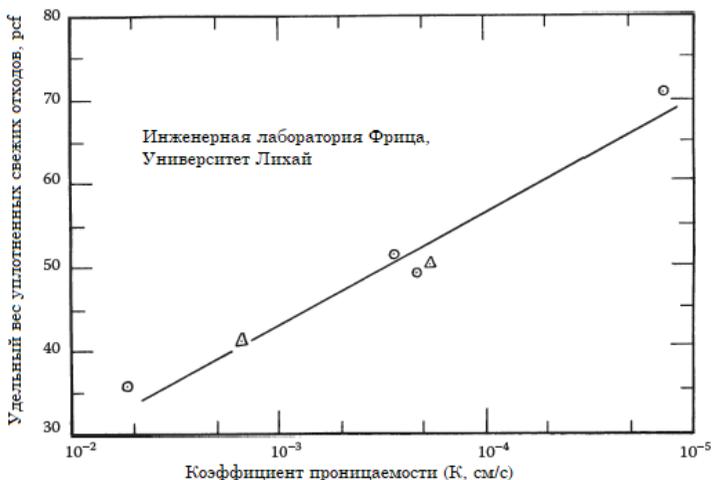


Рисунок 17.10. Удельный вес уплотненного мусорного блока (тюка) в зависимости от коэффициента проницаемости, определяемого с помощью теста на постоянную напорную проницаемость.

17.5.3. Гидравлическая проводимость

Проницаемость образцов уплотненного мусорного блока (тюка) также была подвергнута испытанию с выявлением постоянной проницаемости для напора. Результаты удельного веса тюка в зависимости от коэффициента проницаемости представлены на рисунке 17.10. Была установлена линейная зависимость.

17.6. УСТОЙЧИВОСТЬ МУСОРА В УСЛОВИЯХ СТАДИИ РАЗЛОЖЕНИЯ

17.6.1. Основные соображения

С точки зрения инженерно-геологического проектирования, следующие основные факторы должны быть рассмотрены для анализа и проектирования средств контроля над захоронением отходов.

1. Технология контроля любой загрязненной воды (фильтрата) на свалке, просачивающейся в подземный водоносный горизонт.
2. Способы или процедуры покрытия свалки, чтобы никакие дополнительные воды (то есть дождевая вода, поверхностные воды) и животные не мешали материалам свалки.
3. Оценка воздействия (нагрузка) полигона на окружающую среду.
4. Гидропроводность и явления массового переноса на полигоне и вокруг него.

17.6.2. Процессы разложения

Разложение – это естественный процесс. Любой материал в данном месте из-за различных факторов окружающей среды через определенное время постепенно изменит свою форму и свойства, как описано в разделе 5.10. Этапы процесса между свежим и стареющим мусором показаны на рисунке 17.11.

Изучив рисунок 17.11, можно выделить четыре этапа декомпозиции. Механическое изменение считается краткосрочным процессом, в то время как другие изменения являются долгосрочными процессами. Химические процессы растворяют минералы или ухудшают их свойства. Другие включают физико-химические и геомикробиологические процессы. На рисунке 17.12 показан геоморфологический процесс в 10-летнем образце мусора, отраженный на кривой распределения зерен по размерам.

Большое количество оседаний на свалке обусловлено механическими нагрузками, вызываемыми снегом, дождевой водой и т. д. Поскольку отходы неоднородны и содержат органическое вещество, оседания на участках захоронения также распределены неравномерно. Из-за этого явления верхние уплотнения свалок, то есть шапки, часто ломаются или имеют большие трещины.

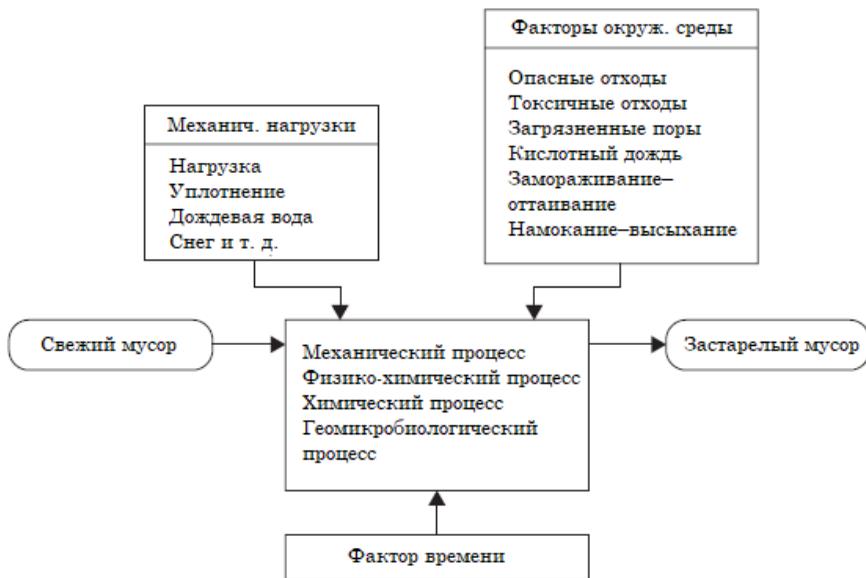


Рисунок 17.11. Стадии процесса старения (геоморфологический процесс) – от свежего до застарелого мусора.

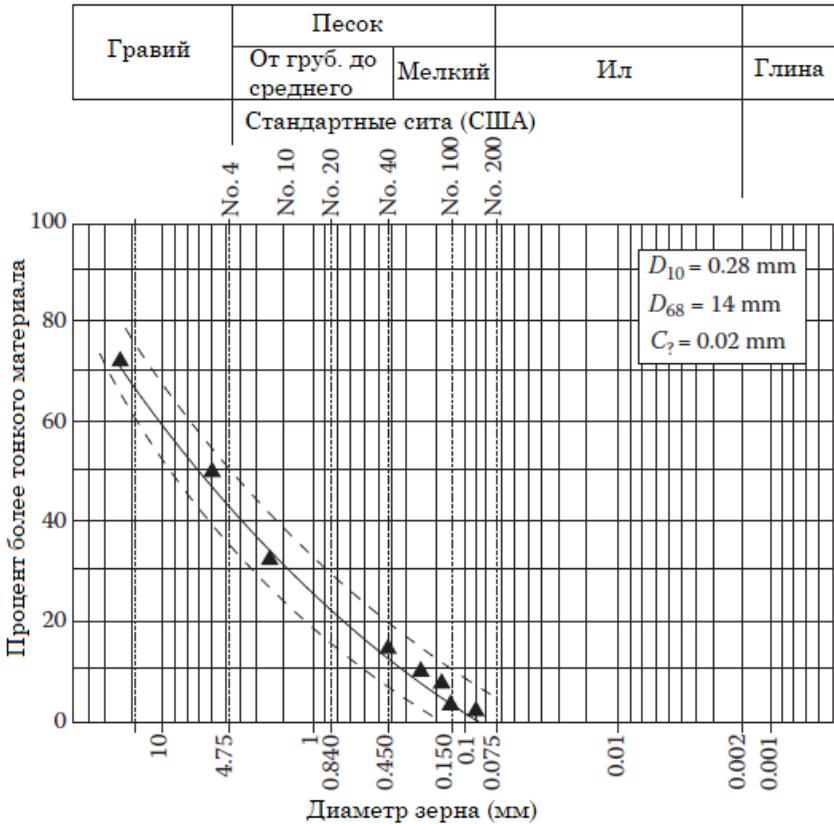


Рисунок 17.12. Распределение размера зерна для 10-летнего образца мусора (по Witmer, K. [1987], Proc. 1st Int. Symp. on Environmental Geotechnology, v. 2, p. 389. Перепечатано с разрешения Envo Publishing, Bethlehem, PA).

Выщелачивание и ионообменная реакция существенно влияют на свойства почвы. Изменения свойств почвы происходят, когда дождевая вода или дренаж удаляют некоторые растворимые глинистые минералы в глиняных подкладках или вокруг полигонов путем выщелачивания. В процессе разложения на полигонах повышается температура грунта. В санитарных зонах захоронения мусор является неоднородным и содержит большее количество органических веществ; постоянно происходят биологические изменения, вызванные разложением. На рисунке 17.13 показана схема, иллюстрирующая совокупное распределение в зависимости от времени в результате разложения органического вещества. В основном, выделяют пять стадий, связанных с бактериальной активностью в отходах.

17.6.3. Прогнозирование оседания

Sowers (1973) предположил, что продолжающееся оседание мусорного полигона аналогично вторичному сжатию почвы и оседанию с учетом времени и глубины заполнения, так как:

$$\Delta H = \alpha \frac{H}{1+e} \log \frac{t_2}{t_1} \quad (17.1)$$

где ΔH – общий расчет, α – коэффициент, который зависит от условий поля, $\alpha = 0,09e$ (для условий, благоприятных для разложения), $\alpha = 0,03e$ (для неблагоприятных условий), H – глубина заполнения, t_1, t_2 – время, e – начальное соотношение пустот.

Yen и Scanlon (1975) предположили, что расчетная ставка может быть рассчитана по следующему уравнению:

$$m = \frac{\alpha}{1+e} \frac{H}{t-1} \log(t) \quad (17.2)$$

где m – расчетный курс, фут/месяц, t – прошедшее время в месяцах.

Другие обозначения в уравнении 17.2 такие же, как в уравнении 17.1.

Из-за характера проблемы анализ оседаний на свалке не может быть осуществлен с помощью математического уравнения. Полуэмпирические методы, такие как уравнения 17.1 и 17.2, могут быть лучшим подходом в настоящее время. Yen и Scanlon предположили, что предварительная подготовка свалки может устранить некоторое первоначальное оседание. Скорость оседания на мусорном полигоне является важным фактором, о котором сообщают многочисленные исследователи, включая моделирование, лабораторные, полевые наблюдения и тематические исследования. Недавнее исследование анализа оседания на свалке описано в работе Chen и Lee (1996).

17.6.4. Типы загрязненной воды и производимые давления

17.6.4.1. Типы загрязненной воды, образующейся на полигонах

Загрязненная вода, образующаяся на свалке, обычно называется выщелачивателем. Свойства фильтрата также меняются от сообщества к сообществу, а также от сезона к сезону. В таблице 17.5 приведены результаты национального обследования и его диапазоны. Фильтрат может быть сгруппирован в неорганические и органические поровые жидкости.

1. *Водные неорганические.* Водными неорганическими жидкостями являются те, в которых вода является растворителем, а растворенное вещество в основном неорганическое.

2. *Водные органические.* Водными органическими жидкостями являются те, в которых вода является растворителем, а растворенные вещества являются преимущественно органическими. Органическая часть охватывает органические отходы и органические жидкости.

3. Органические отходы. Органические отходы – это те отходы, в которых органическая жидкость является растворителем, а растворенные вещества – это другие органические химические вещества, растворенные в органическом растворителе.

4. Органические жидкости. Органические жидкости можно классифицировать как органические кислоты и органические основания. Органические кислоты включают те органические жидкости, которые реагируют с основаниями и включают доноры протонов, а органические основания включают любую органическую жидкость, способную превращать протон в ионизированный катион.

Таблица 17.5. Диапазон состава фильтрата с полигона.

Компоненты и показатели	Диапазон
pH	3,7–8,5
Твердость, CaCO ₃	200–7600
Щелочность, CaCO ₃	3 720–9500
Ca	240–2400
Mg	64–410
Na	85–3 800
K	28–1700
Fe	0,15–1640
Ион железа	8–9
Хлорид	50–2400
Сульфат	20–750
Фосфат	0,5–130
Органический азот	3,0–490
NH ₄ -N	0,3–480
БПК (биохимическое потребление кислорода)	22 000–30 000
ХПК (химическая потребность в кислороде)	800–50 000
Zn	0,02–130
Ni	0,15–0,9
Взвешенные вещества	13–27 000

Источник: данные из Evans, J. C. (1991) and Fang, H. Y. (1995a), GREEN'93, U.K., Waste Disposal by Landfill, R. W. Sarsby, ed., A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 47–72.

17.6.4.2. Кислотность на границе контакта глины и подкладки полигона

Большинство поровых флюидов, появляющихся на свалке, являются кислотными, как описано в разделе 5.3. Эти кислоты просачиваются из мест захоронения отходов к подкладке, независимо от используемых типов подкладок; загрязненная жидкость должна взаимодействовать с почвой на разных стадиях. Все почвы содержат ионы H в своих водных фазах, так как сама вода диссоциирует на ионы H и OH. Более высокие концентрации H обусловлены обменными ионами H на частицах почвы и/или присутствием минеральных или органических кислот, например, H₂SO₄, в результате окисления пиритов и разложения растительности. Кислотность почвы меняется в зависимости от сезона.

17.6.4.3. Экологическое давление, производимое на полигоне

Экологические нагрузки или стрессы, возникающие в почвенно-водной системе, вызваны главным образом изменением местных условий окружающей среды. Существует как минимум четыре типа давления (таблица 5.5) в дополнение к внешним нагрузкам: добавочная нагрузка на месте захоронения отходов, боковое давление на грунт или нагрузки, вызванные строительными работами вокруг места захоронения отходов (разделы 5.7 и 5.8).

17.6.4.4. Явление проводимости между полигоном и подкладкой

Поток через мелкозернистый материал подкладки имеет низкую скорость и является неустойчивым, неоднородным или иногда прерывистым и содержит токсичные или опасные вещества в твердой или газовой форме. Существует как минимум шесть возможных причин, которые могут вызвать движение потока из одного места в другое, как показано в таблице 7.2. Во всех случаях давление или поток и причины движения имеют небольшую величину; однако накопления этих небольших количеств могут быть достаточно значительными, чтобы вызвать загрязнение подземных вод, что влияет на стабильность всех систем контроля отходов. Бактериальная и химическая коррозия или эрозия могут вызвать утечку через барьер. Многие тематические исследования показывают, что подкладки или барьерные стенки протекают из-за этих незамеченных или обычно считающихся неважными факторов. Например, скоростной напор (раздел 7.3) в почве обычно незначителен, тем не менее для прогнозирования миграции загрязнения этот небольшой напор также должен быть рассмотрен.

17.7. ОСНОВНЫЕ КРИТЕРИИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОТХОДОВ

17.7.1. Общее обсуждение

Объекты для захоронения отходов могут быть разделены на три категории, как показано в таблице 17.6. Описание объекта должно включать первостепенную информацию – действующая ли это площадка для захоронения отходов или нет.

Таблица 17.6. Классификация объектов для захоронения отходов.

Категория объекта	Описание объекта	Общие названия свалок	Утилизация отходов
I	Неактивный полигон	Брошенная Неактивная Закрытая Незаконная Нерегулируемая Бесхозная	Почти нет
II	Активная утилизация	Безопасная Санитарная	Немного
III	Обезвреживание в будущем	Комплекс обработки отходов, утилизация отходов	Хорошо управляемая

Источник: по Evans, J. C. and Fang, H. Y. (1982), Proc. National Conf. on Management of Uncontrolled Hazardous Waste Sites, Washington, D.C., pp. 175–182.

Системный подход к контролю над отходами требует от инженера полной оценки как площадочных, так и подповерхностных условий и оценки применимости альтернатив защитной оболочки. Основные требования к контролю над отходами даны Sarsby (1995) и Daniel and Koerner (1995).

Для анализа существующей информации, включая исторические данные о месте, геологические данные и данные о подземных водах, для прошлых мест захоронения необходимо получить как можно больше информации о типах захороненных отходов, графике захоронения отходов и предыдущих методах захоронения, то есть о жидкостях, твердых отходах и отстойниках. Здесь могут быть использованы аэрофотоснимки. Информация о подземных условиях может быть получена из прошлых записей и буровых работ, из истории строительства объекта и из геологической информации.

17.7.2. Оценка существующего объекта и определение его состояния

Нужно хорошо оценить существующие условия на площадке, включая геологические условия, условия подземных вод и распределение загрязнения. На данном этапе потребуются исследование *in situ*. Использование геофизических инструментов и других методов неразрушающего контроля (НК) до испытания буровых установок или установок для мониторинга скважин может предоставить ценную информацию о подземных условиях.

Количественная оценка условий на площадке, включая направление, объем и скорость потока подземных вод, взаимодействие подземных вод с поверхностными водами, распределение загрязнения в системе подземных вод и загрузку загрязняющих веществ. Степень сложности этого этапа количественной оценки может варьироваться от простой концептуальной модели до сложной компьютерной модели. Например, для этой цели может быть использована экспертная система GEOTOX (Mikroudis и Fang, 1987).

17.7.3. Разработка программы локализации и утилизации

Программа локализации и утилизации тесно связана с экологической геотехнологией. Во многих случаях подземные исследования – это прежде всего геогидрологические исследования. Геотехнические свойства почвы обычно не могут быть предметом шаблонного исследования. Желательно, чтобы геотехнические инженерные материалы были использованы на этапе исследования площадки, чтобы избежать будущих пробелов в данных. Таким образом, испытание должно включать тесты на физико-химические и инженерные свойства (Collins и Johnson, 1988; Acar и Daniel, 1995).

17.8. КОМПОНЕНТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОТХОДАМИ

Системы контроля твердых и жидких отходов могут состоять из широкого спектра компонентов. Эти компоненты можно разделить на две основные категории: активные и пассивные. Компоненты системы контроля отходов показаны на рисунке 17.14.

17.8.1. Активные и пассивные компоненты

17.8.1.1. Активные компоненты

Активные компоненты системы локализации, перечисленные на рисунке 17.14, – это те, которые требуют постоянного ввода энергии. Примеры активных компонентов включают в себя очистные скважины, насосные скважины и очистные сооружения. Утилизирующие скважины включают в себя нагнетательные скважины; насосные скважины включают в себя прокачку через насосный гребень, а процессы обработки включают специальные процессы с активированным углем.

17.8.1.2. Пассивные компоненты

Пассивные компоненты системы сдерживания, перечисленные на рисунке 17.14, – это те, которые не требуют постоянного ввода энергии. Типичные примеры пассивных компонентов включают систему дренажных труб, барьерные стены, подкладки и шапки. В то время как активная система требует постоянного ввода энергии, пассивные компоненты обычно требуют технического обслуживания. Например, необходимо не допустить проникновения корней растительности в глиняную шапку. Дальнейшее обсуждение влияния деревьев и прочей растительности на стабильность подкладки будет представлено в разделе 17.9. Пассивные компоненты могут быть далее разделены на подсистемы. Подробное обсуждение каждого случая будет дано ниже.

Стены барьеров

- Почвенно-бentonитовые срезанные стены
- Цементно-бentonитовые стены
- Композитная система вертикальных барьеров
- Виброизлучающие срезающие стены

Верхние слои (шапки)

- Шапки из натуральной глины
- Бentonитовые шапки
- Полимерные мембранные шапки

Нижние уплотнения (подкладки)

- Подкладки из натуральной глины
- Бentonитовые глиняные подкладки
- Полимерные мембранные подкладки



Рисунок 17.14. Системы контроля твердых и жидких отходов (по Evans, J. C. and Fang, H. Y. [1982], Proc. 3rd. National Conf. on Management of Uncontrolled Hazardous Waste Sites, Washington, D.C. pp. 175–182).

17.8.2. Структура компонентов системы управления

17.8.2.1. Барьерные стены

Сдерживание миграции загрязняющих веществ из существующих мест захоронения или отстойников может потребовать подповерхностного барьера для горизонтального потока подземных вод. Барьеры обычно строятся в виде стенок из грунта и бентонитового шлама или стенок из цемента и бентонита. Также используются стены, перекрывающие вибрационную балку, шторы для затирки или шпунт. Чтобы барьерные стены были эффективными, их, как правило, вводят в непроницаемый слой природных материалов под площадкой.

17.8.2.2. Бентонитовая суспензионная стена

Процедура проектирования и строительства стенок из грунта и бентонитовой суспензии хорошо документирована. Как показано на рисунке 17.15а, траншея выкапывается под поверхностью земли, и стабильность траншеи поддерживается с помощью суспензии бентонита и воды. Эта суспензия поддерживает стабильность траншеи во многом так же, как буровой раствор поддерживает стабильность скважины. Рисунок 17.15b – это фотография фактической установки. Водная суспензия бентонита спроектирована инженером-геотехником так, чтобы она имела надлежащие свойства: плотность, вязкость и потерю фильтра, которые позволяют формировать фильтрационную корку вдоль стенок

траншеи, что приводит к вычисленному коэффициенту безопасности для устойчивости траншеи, превышающему единицу. Глубина траншеи, как правило, ограничена 10 м, траншеи выкапываются обычными экскаваторами. Для достижения большей глубины требуется модифицированная рукоять ковша, которая может быть предоставлена специализированными подрядчиками. Чтобы зайти глубже 17 м, обычно требуется использование двусторчатого ковша; для этой цели был разработан удлиненный экскаватор, способный копать до глубины 22 м (Evans, 1991; Bagchi, 1990).

Типичное поперечное сечение суспензионной стены во время земляных работ и после обратной засыпки показано на рисунке 17.16. После выкапывания и добавления шлама траншею засыпают матрицей из грунтовых материалов. Смесь грунта и водной суспензии бентонита обычно имеет консистенцию, аналогичную консистенции бетона с высоким содержанием осадка. Чтобы спроектировать стенку почвенно-бentonитовой суспензии для локализации отходов, необходимы исследования, помимо тех, которые обычно требуются для других применений. Может потребоваться химический анализ образцов конкретных материалов, которые рассматриваются как потенциальные материалы обратной засыпки.

17.8.2.3. Цементно-бentonитовое шпунтовое ограждение

В качестве альтернативы стенам из грунта и бентонита могут быть использованы стены из цемента и бентонита. Траншеи выкапываются способом, аналогичным для создания грунто-бentonитовых стен, как описано в случае 1, с использованием суспензии для поддержания стабильности траншеи. Однако в цементном растворе используется цемент, а не почва. Суспензию заливают в траншею и оставляют застывать. Прочность, эквивалентная жесткой глине, может быть получена примерно через месяц. Конструктивные соображения включают содержание и тип цемента и бентонита, а также их связь с прочностью и проницаемостью засыпки. Испытания на совместимость фильтрата должны проводиться с использованием проникающего вещества, загрязняющего окружающую среду. Общая проницаемость цементно-бentonитовой стены, как правило, выше, чем у грунтово-бentonитовой стены.

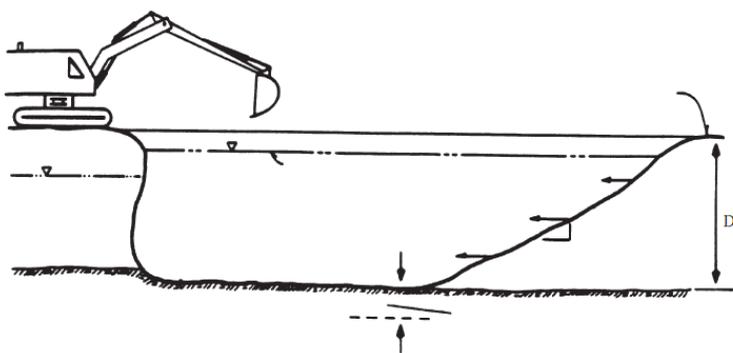


Рисунок 17.15а. Раскопки шламовой траншеи: схематический разрез раскопок шламовой траншеи и обратной засыпки.



Рисунок 17.15b. Раскопки шламowego желоба: фото с изображением раскопок шламowego желоба.

17.8.2.4. Композитная система вертикального среза барьера

Druback и Arlotta (1985) предлагают концепцию создания вертикального непроницаемого барьера для предотвращения миграции загрязненных грунтовых вод или фильтрата с места залегания опасных отходов. Композитная система представляет собой гибридную срезанную стенку, построенную из полиэтилена высокой плотности (HDPE) и обратной засыпки песка; она устанавливается с использованием метода строительства желоба. При установке создается очень низкий проницаемый композитный вертикальный барьер с уникальными инженерными свойствами, включая улучшенную химическую стойкость, обнаружение утечек и контроль миграции подземных вод. Полномасштабный проект испытания конструкции системы был выполнен на существующей санитарной свалке в Нью-Джерси, чтобы продемонстрировать общие процедуры изготовления и строительства. Процедура создания такой системы включает проектирование как конструкции, так и ее производительности, как это описали в своей статье Druback и Arlotta.

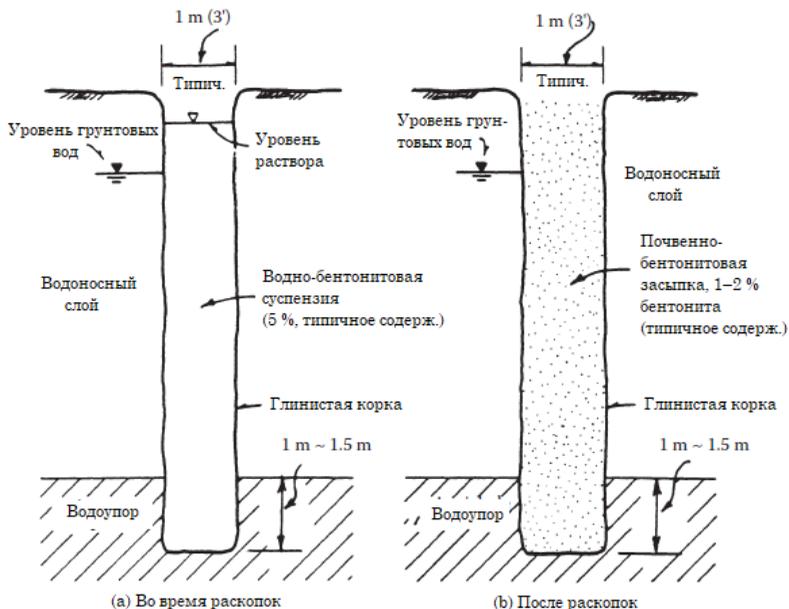


Рисунок 17.16. Типичный разрез стенок почвенно-бentonитовой засыпки.

17.8.2.5. Стены с вибрирующими балками

Барьеры для горизонтального потока подземных вод были спроектированы и построены с использованием метода установки вибрирующей балки. В этом методе используется вибропогружатель вибрационного типа для проникновения балки заданных размеров на заданную глубину. Шлам добавляется через инъекционные сопла, когда балка проникает в подповерхностные почвы и когда балка удаляется.

Суспензия, используемая с помощью вибрирующей балки, обычно бывает двух типов – цементно-бentonитовой или битумной. Вопросы, касающиеся смеси

цемент–бентонит обсуждались в случае 2. Битумные растворы готовят в виде гомогенной смеси асфальтовых эмульсий, песка, портландцемента и воды. Летучая зола также может быть включена. Сообщается, что этот битумный раствор может противостоять сильным кислотам и отходам с высоким содержанием соли. Использование тонких стенок среза шлама, установленных методом вибрирующих балок, обсуждается в работе Leonards и соавторов (1985).

17.8.3. Верхние уплотнения (шапки)

Функция верхних уплотнений или поверхностных уплотнений (шапок), как показано на рисунке 17.17, заключается в контроле поверхностных вод, чтобы минимизировать инфильтрацию или предотвратить проникновение животных в места захоронения отходов, тем самым уменьшая последующее производство фильтрата и/или потенциал переноса загрязнителей. Существует несколько типов материалов, которые можно использовать для верхних уплотнений, например натуральная глина, бентонитовая глина и синтетическая мембрана. Краткое обсуждение каждого материала представлено ниже.

17.8.3.1. Шапки из натуральной глины

Наиболее экономически эффективным верхним уплотнением обычно является природный глинистый материал из местных источников. Если подходящие нативные глины отсутствуют, необходимо использовать импортные материалы или синтетические мембраны. В общем, глины прослужат дольше, чем синтетические материалы, и обычно выбирают глиняные шапки, а не синтетические. Однако, чтобы избежать эффекта ванны (когда больше воды попадает в емкость, чем может вытечь), необходимо использовать шапку с синтетической мембраной, если нижний слой также является синтетической мембраной (EPA, 1982).

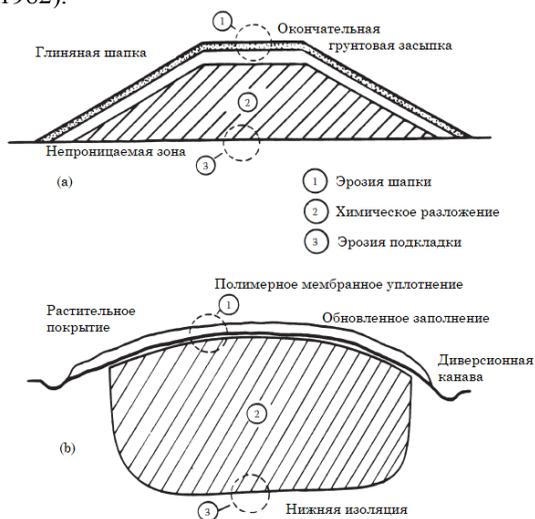


Рисунок 17.17. Типичное сечение системы контроля отходов: (а) верхняя глинистая изоляция и (б) полимерная мембранная изоляция.

Выбор глинистых материалов для глиняных шапок основан на гидравлической проводимости местного материала, как пишет Sarsby (1995). Как показано на рисунке 17.17, толщина глиняной шапки обычно составляет от 0,6 до 0,8 м. Перечислим некоторые факторы, которые следует учитывать при проектировании.

1. Верхние несколько дюймов глины не могут быть так же уплотнены как остальная часть толщи. Кроме того, в долгосрочной перспективе может быть затруднительно поддерживать плотность глины в нескольких верхних дюймах из-за ее возможного растрескивания и высыхания.

2. Дно глиняной шапки может немного смешиваться с грунтовым материалом во время строительства. Следовательно, эффективная толщина номинальной 0,6-метровой шапки может быть меньше.

3. Процедуры уплотнения для глиняных шапок аналогичны процедурам для стандартных уплотненных заливок (раздел 11.2).

4. Следует учитывать защиту от деградации из-за эрозии, вызванной дождевой водой; растрескивания в результате высыхания; массопереноса; а также от воздействия корней деревьев.

17.8.3.2. Бентонитовые глиняные шапки

Если местная натуральная глина не доступна в достаточном количестве или не устраивает ее качество или цена, обычно используют переработанную глину. Переработанная глина обычно представляет собой натриевые монтмориллонитовые отложения. Бентонит – это гидрофильная коллоидная глина, которая набухает в воде. Конструкция шапки из обработанной глины требует применения бентонита с контролируемой скоростью (например, около 2 фунтов/дюйм²), адекватного смешивания с грунтом до заданной рыхлой толщины и уплотнения. Основным преимуществом этого метода является низкая стоимость при относительно низкой гидравлической проводимости. Недостатками являются трудность получения равномерного нанесения при скорости смешивания, а также то, что бентонитовая глина очень чувствительна к поровой жидкости. Если вводится загрязненная вода, ожидаются значительные изменения в поведении глины (Anderson и соавторы, 1985).

17.8.3.3. Синтетические мембранные шапки

Синтетические мембраны (рисунок 17.17b) могут использоваться в качестве верхних шапок для локализации отходов. Мембраны доступны в широком ассортименте материалов от многочисленных производителей. Сообщается о последних изменениях в материалах и/или технологии для создания шапок.

Kargbo и соавторы (1993) обсуждали экологическое значение кислых сульфатных «глин» в качестве покрытия для отходов. Разработчики глиняных шапок проверяют способность материалов потенциальных глиняных шапок генерировать кислоту путем инкубации образца предполагаемой покровной почвы (pH > 3,5) во влажных аэробных условиях при комнатной температуре. Считается, что почва содержит сульфидные материалы, если в течение 8 недель наблюдается снижение pH на 0,5 или более до значения pH 4,0 или менее. Затем следует принять решение о том, нужно ли отказаться от глинистой почвы или использовать ее с поправками для преодоления кислотности.

Zimmie и соавторы (1995) использовали макулатуру для материала покрытия свалок. Отстой на бумажных фабриках имеет высокое содержание воды от 150 до 250 % и обладает высокой степенью сжимаемости. Состоящий из 50 % каолинита и 50 % органики, шлам ведет себя как высокоорганическая почва. Основываясь на стандартных лабораторных испытаниях на образцах *in situ*, ученые указывают, что гидравлическая проводимость соответствовала требованию 1×10^{-7} см/с для шапок свалок. Недавние исследования, касающиеся шапок, даны Lee (1996) и Ling и Leshchinsky (1996).

17.8.3.4. Другие средства контроля поверхностных вод

В дополнение к поверхностному уплотнению системы отвода и сбора поверхностных вод могут обеспечить краткосрочные и долгосрочные меры по изоляции мест захоронения отходов от попадания поверхностных вод. Методы, используемые для контроля затопления и переноса эрозии за пределы площадки для материалов покрытия и поверхностного уплотнения, включают в себя дамбы и насыпи, канавы-перехватчики, диверсионные дамбы и насыпи, террасы, листы и водосточные трубы, канализационные каналы, а также отстойники и пруды. Поверхностные уплотнения выполняют множество функций в общей системе контроля содержания жидких и твердых отходов. Основная функция рассматривалась как контроль проникновения воды, минимизация ее содержания и/или максимизация поверхностного стока со стороны, а также минимизации эрозии.

17.8.4. Нижняя изоляция (подкладка)

В новых средствах локализации часто необходимо обеспечить систему подкладок. Основной функцией подкладки является предотвращение попадания фильтрата или отходов в подземные воды; подкладки, как и шапки, могут состоять из природных глин, обработанных глин или синтетических мембран. Важно отметить, что во Временных правилах EPA 1982 года говорится, что подкладка из синтетической мембраны лучше всего «предотвращает» миграцию отходов, тогда как глиняный вкладыш «минимизирует» миграцию отходов.

17.8.4.1. Глиняные подкладки

Совместимость между природными глинами и отходами является важным соображением при проектировании использования природных глин в качестве подкладок. Важно выяснить показатели изменения объема и характеристики проницаемости предполагаемого материала глиняной подкладки. Транспортировка жидких отходов через трещины, как описано в разделе 17.6, должна быть исключена. Массовая транспортировка жидкости через глиняные подкладки может происходить из-за различного осаждения материалов основания фундамента.

17.8.4.2. Бентонитовые глиняные подкладки

Проектные и конструкционные соображения для использования обработанной глины для подкладок должны включать совместимость с отходами, а также рассмотренные ранее соображения. Особенности изменения объема обработанной глины особенно важны. Как правило, обработанная глина смешивается с материалом основания для образования непроницаемой подкладки. Полное

сопротивление потоку грунтовых вод обусловлено прежде всего обработанными глинами, особенно когда почва матрицы относительно свободна от естественных мелких частиц. Следовательно, если обработанная глина сжимается при воздействии отходов, может произойти значительное увеличение проницаемости. Рекомендуется увлажнение обработанной глиняной подкладки незагрязненной водой перед утилизацией отходов. В этой ситуации должны проводиться испытания на трехосную проницаемость (раздел 7.3) с фактическим предложенным материалом глинистого субстрата, грунтовыми водами и фильтрами для выщелачивания, обсуждавшимися ранее.

17.8.4.3. Геосинтетические мембранные подкладки

Как и в случае с другими типами подкладок, совместимость отходов является основным соображением при проектировании. Однако проницаемость полимерной подкладки также может быть увеличена из-за ее растяжения. Таким образом, полное и дифференциальное обоснование фундамента может повлиять на конструкцию подкладки. Тщательный контроль конструкции имеет важное значение для общей производительности системы. «Проницаемость» установленной системы мембранных подкладок, как правило, является функцией транспортировки навалом через шов, соединения, разрывы и отверстия. Долговечность геомембран обсуждает в своей работе Koerner (1994). Исследования включали ультрафиолетовое излучение, химическую деградацию, а также набухание, окисление и воздействие температуры. Кроме того, прогнозные методы для оценки долговечности также предлагаются и обсуждаются.

17.8.5. Двухкомпонентная система подкладок

Система двойной композитной подкладки, которую предложили Daniel и Koerner (1991), основана на комбинации глинистых и геотекстильных структур, как показано на рисунке 17.18. Эта система является минимальным стандартом обслуживания, которому должны соответствовать будущие свалки, на которых могут происходить масштабные процессы выщелачивания. Эти системы требуют тщательного проектирования, испытаний и строительства. Система состоит из четырех основных частей:

- система сбора фильтрата (слои 1, 2 и 3);
- первичная подкладка (слои 4, 5 и 6);
- система обнаружения утечек (уровень 7)
- вторичная линия (слои 8 и 9).

Эти основные части состоят из девяти слоев. Десятый слой, грунт или горная порода, дополняет систему двойных композитных подкладок.

17.8.5.1. Системы сбора сточных вод

Система сбора фильтрата является самым верхним сегментом, как показано на рисунке 17.18. Система состоит из высокопроницаемого сыпучего материала на основании установки для захоронения, а высокопропускающий геокompозитный материал для боковых откосов обеспечивает своевременное укрытие с адекватной защитой.

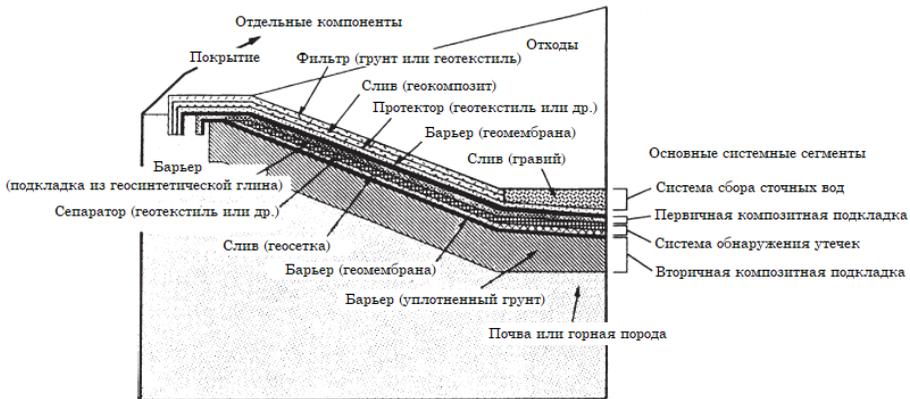


Рисунок 17.18. Двухкомпонентная система укладки мусорных свалок (по Daniel, D. E. and Koerner, R. M. [1991], Civil Engineering, ASCE, New York, pp. 46–49. С разрешения ASCE).

17.8.5.1.1. Слой 1: фильтры (грунт или геотекстиль)

Этот слой, отделяющий нижнюю часть отборного слоя отходов или начального слоя почвы от среды для сбора и выщелачивания, имеет важное значение. Если взвешенные частицы из фильтрата попадают в дренажную систему, они могут забить ее. Чтобы свести к минимуму эту проблему, предлагается использовать фильтры только тогда, когда они действительно необходимы, и использовать фильтры с высокой проницаемостью. Геотекстильный фильтр является частью дренажного слоя геокомпозита вдоль боковых склонов. Геотекстиль, если его оставить открытым, чувствителен к ультрафиолетовому свету.

17.8.5.1.2. Слой 2: слив (гравий для основания, геокомпозит для боковых откосов)

Слой для сбора фильтрата требует высокой пропускной способности и определенного размера пор, чтобы противостоять засорению.

17.8.5.1.3. Слой 3: протектор (геотекстиль или другое)

Этот слой предотвращает прокалывание материалов в дренажном слое основной геомембранной подкладки. Протектором обычно является толстый нетканый геотекстиль.

17.8.5.2. Первичная композитная подкладка (рисунок 17.18)

17.8.5.2.1. Слой 4: барьер (геомембрана)

Этот компонент первичной подкладки может быть изготовлен из полимерных материалов, включая поливинилхлорид (ПВХ), хлорированный полиэтилен (СРЕ), хлорсульфонированный полиэтилен (ССПЕ), этиленовый интерполимерный сплав

(EIA), полиэтилен высокой плотности (HDPE) и очень низкий полиэтилен высокой плотности (VLDPE).

17.8.5.2.2. Слой 5: барьер (геосинтетическая глиняная подкладка)

Для грунтового компонента основной подкладки рекомендуется подкладка из геосинтетической глины (GCL). GCL, ранее называемая сборными глиняными одеялами, представляет собой фабричные слои сухой бентонитовой глины, расположенные между геотекстилем или прикрепленные к геомембране.

17.8.5.2.3. Слой 6: разделитель (геотекстиль или другое)

Чтобы избежать миграции частиц глины из GCL в нижележащую геосеть, необходимо адекватное разделение. Наилучшие результаты в экспериментальных испытаниях были получены с (1) нетканым геотекстилем с игольными перфорациями с небольшими видимыми отверстиями; (2) нетканым геотекстилем с термоскреплением; (3) с геомембранами.

17.8.5.3. Система обнаружения утечек (рисунок 17.18)

Эта система обнаружения утечек является третьей по значимости частью системы. Она также известна как система сбора вторичного фильтрата. Она идентифицирует утечку из первичной системы футеровки и позволяет ее собирать и удалять.

17.8.5.3.1. Слой 7: слив (геосетка)

Геосетка предпочтительнее, чем гранулированные материалы для слоя обнаружения утечки, потому что ее гораздо легче размещать на боковых склонах, и ее можно размещать с использованием легкого оборудования, а также потому, что гранулированные материалы могут пробивать геомембрану. Геосетки также предлагают более быстрое обнаружение утечек, чем большинство гранулированных материалов. Предприятия, занимающиеся опасными отходами, как правило, должны обнаруживать утечки в течение 24 часов, и зачастую геосеть является единственным материалом, который может это сделать.

17.8.5.4. Вторичная композитная подкладка (рисунок 17.18)

17.8.5.4.1. Слой 8: барьер (геомембрана)

Технические требования к вторичной геомембранной подкладке, как правило, такие же, как и для первичного слоя (слой 5), поэтому обычно используются материалы того же типа и толщины.

17.8.5.4.2. Слой 9: барьер (уплотненный слой грунта)

Уплотненный грунт подкладки может быть создан без риска повреждения любых основных компонентов системы подкладки.

17.8.5.5. Слой 10: субстрат (почва или горная порода)

Для крупных объектов необходимо полное исследование подземных почв. Как только стабильность основания обеспечена, объект должен быть проверен и оценен.

17.9. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОТХОДАМИ

17.9.1. Химическое воздействие и воздействие корней деревьев на подкладку

Контроль и поддержание стабильности системы контроля отходов важны с экономической точки зрения, потому что ремонт на любых объектах в опасных или токсичных местах очень дорог. Есть множество факторов, влияющих на стабильность системы, однако химические и бактериальные воздействия и воздействия корней деревьев являются наиболее значительными. Когда жидкость взаимодействует с твердым веществом, это происходит только на поверхности твердого тела. Для глинистого минерала поверхность электрически заряжена. Жидкая фаза, с другой стороны, является более сложной, чем твердая фаза, поэтому внимание будет сосредоточено на взаимодействии жидкости с загрязненной подкладкой.

В целом, места захоронения засажены деревьями или другой растительностью с целью обустройства мест захоронения отходов, но посадка деревьев или растительности также имеет вредный побочный эффект. Укажем два важных момента, касающихся того, что корни деревьев атакуют подкладки.

1. Корни деревьев всегда находятся в поисках питательных веществ, поэтому место захоронения отходов является для деревьев идеальным местом; корни способны и будут проникать через изоляционные преграды.

2. Поровая жидкость (фильтрат) на свалке будет всасываться корневыми волосками.

Все высшие растения требуют огромного количества воды, практически все они поглощают ее из почвы через корневые системы. Для абсорбции предусмотрены специальные органы, которые включают верхушку корней и бесчисленные корневые волоски. Кончики корней всегда ищут новые «места кормления». Место для свалки мусора является одним из таких богатых хранилищ.

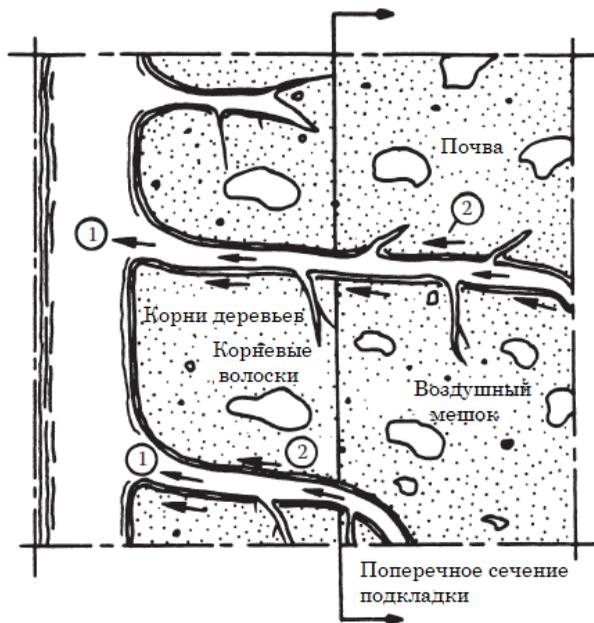


Рисунок 17.19. Механизмы взаимодействия почвы, корней и поровой жидкости (фильтрата) на мусорном полигоне: (1) фильтрат на свалке передвигается через корневые волоски под действием силы всасывания, (2) фильтрат на свалке передвигается между корнем и почвой под действием капилляров.

То, как поровая жидкость (фильтрат) на свалке всасывается корневыми волосками, схематически показано на рисунке 17.19. Это явление миграции влаги внутри корневых волосков и между корневыми волосками и почвой обусловлено силой всасывания и капиллярным действием. Виды растений различаются не только по потребностям в воде, но и по адаптации к количеству присутствующей воды. Некоторые растения устроены так, что могут переносить избыток почвенной воды, тогда как другие могут переносить ограниченную влажность. Поэтому деревья и прочая растительность, посаженные вокруг полигона, должны быть подобраны.

17.9.2. Утечка из непроницаемых грунтовых слоев почвы

Утечка через нижнее уплотнение свалки закончится у барьерной стены и непроницаемого слоя грунта, как показано на рисунке 17.20. В настоящее время только безопасность барьерной стены (рисунок 17.16) является основной целью нашей работы. Проектировщики не подозревают, что утечки могут возникнуть через так называемый непроницаемый слой почвы. Имеется мало информации о разрушении в этой предполагаемой «безопасной зоне».

С точки зрения экологической геотехнологии не существует такого понятия, как «непроницаемый слой почвы». Как обсуждалось в разделах 3.2 и 3.3:

1) почвы – это трехмерные системы, у них есть двумерный ареал, а третье измерение – глубина.

2) они представляют собой геологические отложения или формируются *in situ* в результате взаимодействия геологического исходного материала, климатических факторов, топографии и живых организмов; почвы *in situ* имеют много важных свойств, так как «живые» системы, такие как микрофлора и микрофауна (раздел 5.11), рассеиваются в почвах;

3) природные почвы не являются смесью их компонентов; горизонтальный, а также вертикальный переход в другой тип почвы может быть постепенным или резким в зависимости от геологических и почвообразующих факторов (раздел 5.10);

4) вертикальная дифференциация, вызванная почвообразующими факторами, называется горизонтами, как показано на рисунке 3.3, и между горизонтами существуют пустоты, как показано на рисунке 17.20.

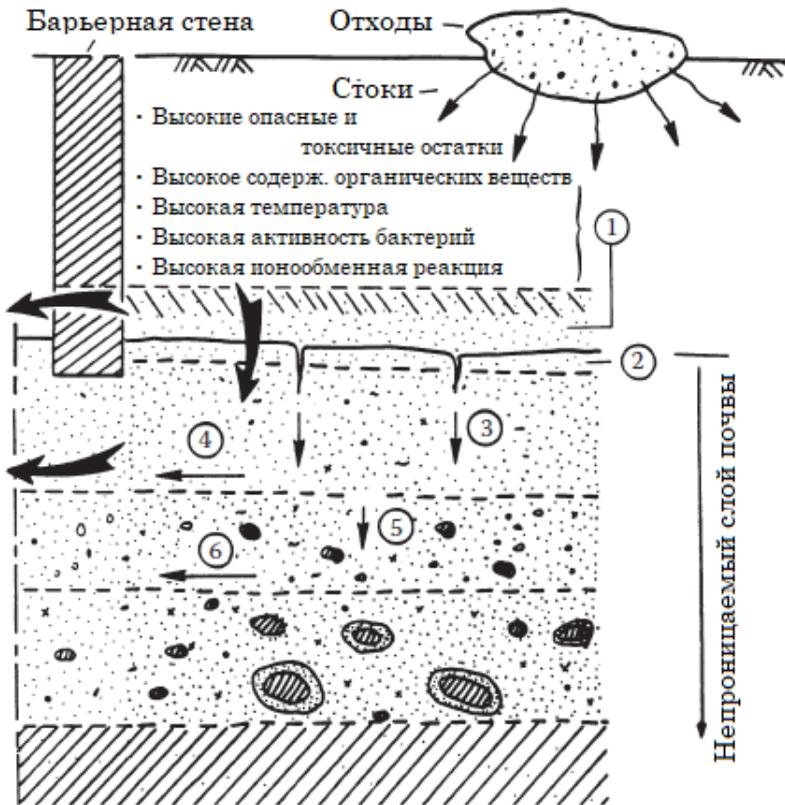


Рисунок 17.20. Утечка фильтрата из непроницаемого слоя почвы.

Когда фильтрат просачивается через уплотнение емкости на полигоне, он попадает в зону [1]. Это та зона, где:

- высокие опасные и токсичные остатки;
- высокое содержание органических веществ;
- высокая температура;
- высокая активность бактерий;
- большое количество ионообменных реакций.

Как обсуждалось в главе 5, взаимодействие почвы и воды в энергетических полях нескольких сред и чувствительность почвы к окружающей среде имеют решающее значение. Явления массопереноса в зоне [2] являются значительными, и некоторое количество фильтрата просачивается через этот так называемый «непроницаемый слой почвы», как показано точками [3–6]. Кроме того, существует горизонтальное капиллярное действие (раздел 7.2), как указано в пунктах [4] и [6] на рисунке 17.20. Для анализа и проектирования средств контроля отходов рекомендуется тщательно изучить условия «непроницаемого слоя почвы».

17.9.3. Динамические эффекты нагрузки

Землетрясение или динамическая нагрузка влияет на загрязненный глинистый материал подкладки, поэтому для анализа и проектирования гидравлических барьеров или любых других средств контроля отходов необходимо учитывать два важных аспекта:

(1) характер взаимодействия почвы и загрязняющего вещества при динамической нагрузке;

(2) каково отношение между нагрузкой и глиняной подкладкой.

Как обсуждалось в разделе 11.11, при ограниченных экспериментальных данных, показанных на рисунках 11.16 и 11.26, могут быть сделаны некоторые комментарии и предложения. Результат теста на статическую нагрузку материала глиняной подкладки показан на рисунке 11.16. В этом эксперименте представлены изменения температуры. При повышении температуры прочность на сдвиг уменьшается, как и ожидалось, но когда концентрация кислоты увеличивается, что отражается на значении pH, прочность на сдвиг также увеличивается, поскольку каталитическое воздействие на почвенно-кислотные реакции будет усиливать связующее действие; следовательно, прочность на сдвиг увеличивается. Результат динамического испытания при комнатной температуре показан на рисунке 11.26 и является противоречием, обозначенным кружком. При динамическом нагружении, если сила динамического возбуждения больше, чем сила связи, создаваемая каталитическим эффектом, более высокая концентрация кислоты не будет способствовать каталитическому эффекту. Как указывает Fang (1994b), динамическая нагрузка может вызывать больше повреждений, чем статическая нагрузка на загрязненных земельных участках.

17.9.4. Влияние близлежащих карстовых воронок и других объектов

Если рядом с объектами для контроля отходов развиваются воронки, существует большая вероятность того, что в объектах контроля возникнет нестабильность. Как обсуждалось в разделе 13.7, загрязненная поровая жидкость ускорит развитие провала, если система контроля отходов находится в карстовой области. Gabr и Hunter (1992) использовали методы конечных элементов в простой деформации для оценки напряжений и деформаций, возникающих на подкладках для захоронения отходов, построенных на существующих или потенциальных воронках. Анализы продемонстрировали важность использования структурных геосеток для уменьшения величины деформации и, возможно, потенциальной возможности разрушения подкладок полигона. В вариациях анализа ключевые параметры включают глубину вскрышных пород (D) и ширину воронки (B). Для отношения D/B 2 фута и D 40 футов деформация растяжения уменьшается с 18 % в случае отсутствия подкрепления до 5 %, если упрочнитель имеется.

Если место захоронения находится рядом с грязевыми отложениями и болотными отложениями (Mitchell и соавторы, 1992) и другими проблемными отложениями почв и горных пород, то необходимо принять надлежащие меры предосторожности, чтобы избежать дальнейших осложнений, как описано в главе 13. Факторы, влияющие на долгосрочные свойства глиняных прокладок и загрязненных глин, обсуждаются в работах Mitchell и Jaber (1990), Meegoda и Rajapakse (1993) и других.

17.10. УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ЦЕЛЕЙ

17.10.1. Общее обсуждение

Новое строительство, расширение, восстановление и техническое обслуживание зависят от поставок большого количества материала. Поскольку экономическое обоснование является одним из основных факторов принятия решений, необходимо изучить низкую стоимость, энергосбережение и использование отходов для этих видов деятельности. Чтобы выбрать существующий материал или разработать новый замещающий материал, необходимо изучить знания о текущем состоянии производства, потреблении материалов, а также об экономических, энергетических и экологических аспектах развития материальных потребностей (Inyang и Bergeson, 1992).

Основываясь на недавнем исследовании, Ahmed и Lovell (1992) провели обобщающее исследование, чтобы определить те отходы, которые продемонстрировали техническую, экономическую и экологическую осуществимость для использования в строительстве шоссе. Текущее использование отходов в автомобильной промышленности США отражено в таблице 17.7. Всего было зарегистрировано 27 отходов. Из 27 отходов в настоящее время только 11 используются тремя или более респондентами, которые перечислены в таблице 17.7 в порядке убывания числа

зарегистрированных пользователей. Использование мусора в качестве материала для строительства автомагистрали обсуждалось в разделе 17.3.

17.10.2. Технология переработки и повторного использования отходов

Тема восстановления ресурсов и повторного использования материалов из отходов привлекла к себе большое внимание в последнее десятилетие, главным образом из-за возросшего числа экологических законов и положений, которые требуют минимизации удаления отходов (Collins и Ciesielski, 1994; Sharma и Lewis, 1994).

Преимущество повторного использования стабилизированных и/или отвержденных отходов можно назвать двойным:

1) *снижение опасности для окружающей среды*: соблюдение правил поможет снизить опасность для окружающей среды;

2) *дополнительная экономия*: эффективное использование этих материалов в качестве недорогой альтернативы традиционным материалам может привести к значительной экономии при условии, что (1) нет вредных воздействий на окружающую среду, а (2) созданный материал служит так же, как материал, который он заменяет

Таблица 17.7. Современное использование отходов в автомобильной промышленности США.

Отходы	Количество штатов, использующих материал	Материал используется как добавка / Материал используется как замена ^a			
		(a) ^b	(b) ^b	(c) ^b	(d) ^b
Переработанные материалы для дорожного покрытия	43	23/8	26/16	14/8	6/5
Угольная зола	33	22/1	6/2	7/-	5/2
Резиновые шины	30	22/-	6/1	1/-	3/3
Доменный шлак	17	5/4	3/5	-/3	1/2
Стальной шлак	9	4/1	2/2	1/-	-/2
Угольный зольный остаток	7	2/-	2/1	1/1	1/1
Котельный шлак	7	4/-	1/1	-/1	-/1
Отработанное моторное масло	7	Используется в качестве топлива – 1; переработано – 3; использование для дамб – 1.			
Макулатура	7	Использовано как рециркуляция – 2; мульча для ландшафтного дизайна – 5.			
Шахтные хвостохранилища	5	-	-	-	-/5
Осадок сточных вод	3	Верхний защитный слой дорожного покрытия – 1; ландшафтный дизайн – 3.			

^a Цифры в каждом столбце показывают количество штатов, использующих отходы либо в качестве добавки, либо в качестве замены традиционных материалов.

^b Ключ к компонентам дорожного покрытия: (a) верхний защитный слой дорожного покрытия, (b) основание, (c) подоснование и (d) земляная насыпь.

Источник: по Ahmed, I. and Lovell, C. W. (1992), Proc. Mediterranean Conf. on Environmental Geotechnology, pp. 409–418.

Технология химической фиксации и отверждения жидкостей и шламов значительно расширилась (EPA, 1985). Использование CFS для отходов относится к 1970-м годам (Conner, 1990). Однако разработка и использование технологии в методах укрепления грунта (например, стабилизация почвы и цементация) являются относительно новыми.

17.10.3. Отходы резиновых шин

17.10.3.1. Общее обсуждение

Агентство по охране окружающей среды США указывает, что производство резиновых шин для автомобилей увеличилось на 42 % с 1960 по 1980 год. В настоящее время в одних только США ежегодно выбрасывается около 280 миллионов отработанных шин. Среди этого количества, только небольшое количество шин было собрано для переработки (5,6 % было добыто в 1988 году). Большая часть отработанных шин сбрасывается на свалку. Свалки утильных шин растут с каждым годом и несут две основные угрозы для человечества:

- 1) опасность пожара: после того как свалка шин загорается, почти невозможно потушить такой пожар, что вызывает серьезное загрязнение воздуха;
- 2) опасность для здоровья: осадочный материал и вода, попавшие в пустые пространства шин, являются идеальной почвой для размножения насекомых, мелких животных, а также бактерий.

17.10.3.2. Текущая практика

Существующие методы повторного использования утильных шин можно разделить в три основные категории.

1. Использовать в качестве источника топлива или в качестве сырья при производстве других полимерных материалов.
2. Использовать в качестве добавки или измельчать на мелкие частицы как часть асфальто-резиновых смесей для использования в качестве заменителя в смесях асфальтового покрытия.
3. Использовать разрезанные на мелкие кусочки, дробленые или цельные шины в качестве легких заполнителей для бетонных смесей или в качестве элемента для усиления грунта.

Если шины используются, как описано в пунктах 1 и 2, необходимы дополнительные процессы очистки, что потребует дополнительных инвестиций и создаст дополнительные экологические проблемы. Кроме того, результаты, полученные из этих категорий для крупномасштабных полевых применений, все еще находятся на стадии проб и ошибок, и не сообщается об определенных успехах.

17.10.3.3. Использование резины старых покрышек

В таблице 17.8 представлена сводная информация об утилизации и повторном использовании утильных резиновых шин.

17.10.3.3.1. Как заполнитель при строительстве

Изучена возможность использования резины в качестве заполнителя при строительстве. Существуют два типа заливок для строительства: первый – уплотненная заливка, обычно используемая в качестве насыпи на шоссе; второй – низкопрочная заливка, используемая для заполнения пустого пространства вокруг опор моста, подпорных стен и фундаментов зданий.

Таблица 17.8. Краткий обзор утилизации и повторного использования старых резиновых шин.

- (1) Переработка шин
 - (a) мазут
 - (b) асфальтовое покрытие
- (2) повторное использование целых шин
 - (a) предотвращение эрозии в сельском хозяйстве
 - (b) искусственные рифы и волнорезы
 - (c) защита берега реки и склонов
 - (d) использование в защитных барьерах на автомагистралях, в опорах мостов и прочих опорах
 - (e) защита от эрозии насыпей
- (3) Агрегаты из шин для дорожных работ
 - (a) основание для проезжей части
 - (b) почвоцементные шинные агрегаты для плеч
 - (c) автостоянки, проезды, тротуары и игровые площадки
 - (d) восстановление дорожных и уличных рытвин
 - (e) защитные фильтры и дренажные агрегаты
- (4) Шинные агрегаты для строительства
 - (a) легкие керамзитоблоки и блоки
 - (b) легкие агрегаты для панелей и стен
 - (c) создание пола и мебели
- (5) Геоэкологическое применение
 - (a) грунтово-цементный шламовый заполнитель для карстовых воронок
 - (b) заполнение пустот в районах добычи
 - (c) стабилизация загрязненной почвы
 - (d) измельченные шины (порошок), используемые для подкладок на мусорных полигонах
 - (e) стенка для суспензии NIP для контроля выщелачивания
 - (f) шумоподавляющие конструкции
 - (g) сейсмозащитные сооружения
 - (h) виброустойчивые конструкции

Источник: подробную информацию о таком использовании можно найти в работе: Fang, H. Y. and Daniels, J. L. (2006), *Introductory Geotechnical Engineering: An Environmental Perspective*, Taylor and Francis, London and New York, 545 p. NIP представляет собой технологию наноразмерных частиц; дальнейшее обсуждение ее характеристик и применения для систем материалов нового поколения (NGMS) приводится в следующем разделе (17.11).

17.10.3.3.2. Ликвидация карстовых воронок

Изучена возможность добавления резиновых отходов в грунт-цемент для заполнения карстовых воронок (Morrison и соавторы, 1993). Эту низкопрочную смесь с более высокой степенью усадки можно использовать при заполнении воронок, поскольку материал должен быть достаточно текучим, чтобы перемещаться через воронку и закупоривать подземные полости, которые могут быть связаны с воронкой.

17.10.3.3.3. Резиновые подкладки из шин

Подкладки из шинной резины и глины против загрязнений на нефтяной основе оценили Ваукал и соавторы (1992). Были получены данные о хорошем взаимодействии между резиной и глиной или летучей золой. Когда в качестве проникающего вещества использовался бензин, гидравлическая проводимость как глины, так и летучей золы возрастала. Значительное снижение значений гидравлической проводимости наблюдалось для смесей с резиной. Частицы каучука являются пластинчатыми и имеют различную длину. Получена типичная кривая гранулометрического состава частиц каучука. Набухшие резиновые волокна при контакте с бензином уменьшали поровое пространство в смесях и уменьшали гидравлическую проводимость.

17.10.3.3.4. Другие способы использования резиновых шин

Резиновые или цельные резиновые шины часто используются для защиты берегов рек, портов или грунтовых склонов. Резиновые шины использовались в качестве легкого заполнителя для базовых материалов на автодорогах с небольшим объемом (Morrison и соавторы, 1993; Frascoia и Cauley, 1995), автостоянках и вторичных сейсмостойких сооружениях.

17.10.4. Другие виды отходов

Твердые, полутвердые или жидкие отходы, полученные с муниципальных, коммерческих или промышленных объектов по переработке отходов, с очистных сооружений или установок по контролю над загрязнением воздуха, исключая очищенные стоки очистных сооружений, являются многообещающими. По сообщениям, драгированные материалы могут быть повторно использованы в качестве обычных строительных материалов.

Проблемы загрязненных нефтью почв вокруг прибрежной окраины обсуждались в разделе 14.4. Использование этих загрязненных нефтью почв для использования в обычных конструкциях изучалось многими исследователями. Большая часть их работы сосредоточена на том, как эту загрязненную почву можно использовать повторно. Один типичный пример показан на рисунке 17.21. Как видно из рисунка 17.21, 10 % масла и 10 % шины из резинового лома диаметром 0,5 дюйма дают лучшие результаты.

17.11. НАНОТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ МАТЕРИАЛОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

17.11.1. Общее обсуждение

Мостом между объемными материалами (то есть материалами, контролируемой массой) и атомной или молекулярной структурой являются наночастицы. Свойства различных материалов меняются по мере приближения их размеров к наноразмерам и увеличения процента атомов на поверхности материала. Свойства наночастиц определяются их большими площадями поверхности. Наночастицы могут быть получены различными способами: измельчение, пиролиз и гидротермальный синтез. Поверхностное покрытие наночастиц очень важно для определения их свойств. Поверхностное покрытие может регулировать стабильность, растворимость и таргетирование. Наночастицы представляют возможную опасность как с медицинской, так и с экологической точек зрения (Mnyusiwalla и соавторы, 2003; Университет Миссури, 2013).

Наноразмерные частицы железа (NIP), называемые nanoорганическими частицами, представляют собой новый класс общих синтетических агентов. Концепцию системы NIP создали Gillham и O'Hannesin в 1994 году. С 1996 года в инженерной лаборатории Fritz в Университете Лихай, по данным Zhang и Associates, проводились всесторонние аналитические и экспериментальные исследования как в лабораторных условиях, так и в условиях *in situ* (Zhang, 2003). NIP представляет собой синтетическое химическое соединение из железа в виде темно-коричневой суспензии. Размер частиц составляет примерно $8,6 \times 10^7 - 1,0 \times 10^9 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Основными преимуществами NIP являются реакционная способность, гибкость и чрезвычайно высокое отношение площади поверхности к объему этих крошечных частиц, что обеспечивает благоприятные кинетические характеристики для селективных реакций сорбции и окисления-восстановления. Применение технологий наночастиц широко распространено в различных областях; также изучается возможность применения нано- или макротехнологий в подземных водах (Karn и соавторы, 2005).

Реакционная способность железных наночастиц (NIP) была использована для восстановления *in situ* для трихлорэтилена (ТСЕ). ТСЕ использовался в качестве растворителя для химической чистки. Он также использовался в промышленных растворителях, клеях, красках и пигментах. Кроме того, было показано, что наночастицы железа способны восстанавливать различные токсины окружающей среды, в том числе хлорированные органические растворители, пестициды, ПХБ и многие тяжелые металлы.

17.11.2. Функция NIP и новые системы материалов

Наноразмерная железная частица (NIP) имеет значительные преимущества, как указано на рисунке 17.22 (Zhang, 2003; Karn и соавторы, 2005). Однако у NIP есть некоторые недостатки: (1) NIP нельзя использовать в колонне с неподвижным слоем, в реактивных барьерах для грунтовых вод или в любой

конфигурации типа пробкового потока из-за чрезмерного падения давления, (2) NIP не долговечна и не обладает механической прочностью. Для NIP, используемой в инженерных целях, необходим поддерживающий элемент. Чтобы использовать преимущества NIP и преодолеть ее недостатки, проводятся обширные исследования и должны быть внесены некоторые изменения. Модификация системы NIP для укрепления грунта описывается следующим образом:

$$M^* = NIP + A$$

где M^* – модифицированный материал земли; NIP – NIP, используемый в качестве агента детоксикации; A – вспомогательный материал.

Агент детоксикации (NIP) + вспомогательные материалы (A)

Некоторые из этих вспомогательных материалов указаны ниже:

1. NIP + [почва + вода]
2. NIP + [бентонит + почва + вода]
3. NIP + [летучая зола + почва + вода]
4. NIP + [летучая зола + известь + вода]
5. NIP + [торфяная почва + летучая зола + вода]
6. NIP + [шлам + почва + вода]
7. NIP = [почва + вода + шинные агрегаты]

Торфяная почва и шлам также рассматриваются в качестве материалов для поддержки барьерных стен. Торф имеет высокую кислотность, а шлам содержит отходы. В настоящее время обычная суспензионная стенка изготавливается из бентонита, почвы и воды. Система материалов нового поколения добавляет NIP к почвенным отходам, чтобы получить лучшие результаты. Были проведены ограниченные лабораторные эксперименты, однако необходимы дальнейшие исследования для применения *in situ* в суспензионных стенах.

17.12. PEZIOME

1. Почти 90 % всех опасных отходов находятся в жидкой форме. Понимание поровых флюидов по поведению подкладки имеет важное значение для проектирования различных компонентов средств контроля отходов. Без хорошего понимания взаимодействия пласта и поровой жидкости нет надежной основы для прогнозирования долгосрочного поведения этих систем.

2. Пассивные методы, представленные в этой главе, могут использовались и для уменьшения миграции загрязняющих веществ. Необходимо уделить внимание выявлению всех путей загрязнения и выбору наиболее подходящего метода контроля. Затем каждый метод должен быть оценен с точки зрения его

эффективности, а проектирование и конструкция должны включать все особенности объекта и технические соображения.

3. Мусор сам по себе является нестабильным материалом. Его прочность низка, а отношение напряжения к деформации нерегулярно. Без применения надлежащих методов стабилизации или укрепления грунта мусор сам по себе не может выдерживать большие нагрузки как по вертикали, так и по горизонтали.

4. Уплотнение поверхности является важным фактором контроля устойчивости склонов полигона. Надлежащий контроль уплотнения необходим в период утилизации отходов. Свежий мусор, сбрасываемый на полигон, должен быть хорошо распределен внутри слоя, в противном случае более тяжелые предметы (рисунок 17.2а) должны сбрасываться ближе к центру полигона, а не по краям полигона.

5. Мусор на полигоне неоднороден. Он не может быть обобщен как обычная геотехническая проблема, поэтому генетическая диагностика мусорных свалок может улучшить наше понимание. Подробный подход и процедура описаны.

6. Компьютерное проектирование или экспертная система, основанная на знаниях, могут помочь в проведении анализа устойчивости склонов на полигонах. Однако человеческий опыт, основанный на генетической диагностике, более эффективен.

7. Утилизация отходов со свалок, таких как утильная резиновая шина, может эффективно использоваться для создания обычных строительных материалов.

ПРОБЛЕМАТИКА

17.1. Определите следующие термины: бытовые отходы, остаточные отходы, городские отходы, твердые отходы, жидкие отходы.

17.2. Какова связь между твердыми и жидкими отходами?

17.3. Прокомментируйте прогноз оседания на свалке.

17.4. Проектировщики не подозревают, что утечки могут проходить через так называемый непроницаемый слой почвы. Каковы ваши комментарии по поводу этого заявления? С точки зрения экологической геотехнологии, существует ли на месторождении такой термин, как «непроницаемый слой почвы»? Как бы вы определили «непроницаемый слой почвы»? Если есть утечка, обсудите маршрут(-ы) утечки и то, как жидкость может пройти через «непроницаемый слой почвы».

17.5. Обсудите традиционный подход к анализу устойчивости склона, такой как метод предельного равновесия и/или метод предельного анализа для сильно неоднородного материала, такого как мусор. Есть ли у вас комментарии касательно генетического подхода для анализа устойчивости склонов полигона? Есть ли смысл в таком подходе?

17.6. Новый промышленный завод должен быть построен на выбранной площадке. После завершения работы завод будет перекачивать сточные воды, которые содержат небольшое количество хлорида натрия, в местную реку. Вниз по течению река используется для орошения высоко известковой (CaCO_3) почвы

региона. Во время вашего исследования почвы на участке завода группа фермеров подает иск против вашего клиента, утверждая, что соли из сточных вод сделают речную воду непригодной для орошения. Действительны ли требования фермеров? Как почвовед, как вы собираетесь спорить в суде?

17.7. Что такое строительный материал и каковы основные требования к нему, чтобы можно было сказать, что такой материал (или отходы) подходит в качестве обычного строительного материала? Перечислите экономико-технологические факторы, влияющие на планирование укрепления грунта, если отходы рассматриваются как составной материал.

17.8. Какой тип взаимодействия существует между резиновой шиной и грунтом? Как использовать три резиновые шины в обычной конструкции?

17.9. Обсудите оптимальное использование материалов (использование местных отходов) и энергии в транспортном строительстве.

17.10. Обсудите точки зрения исследователя, проектировщика и подрядчика на программу укрепления грунта, если отходы рассматриваются как составной материал.

18. Аридные земли, пустыни и меры по борьбе с опустыниванием

18.1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, засушливые земли в мире расширяются, а засуха способствуют экономическому кризису во всем мире. От этого кризиса страдают как промышленно развитые, так и развивающиеся страны. Как указано в разделе 1.7.2, ухудшение продуктивных земель в пустынных условиях продолжается со скоростью 14,8 млн акров в год. В США сообщают, что опустынивание сопровождается падением уровня грунтовых вод и повышением солености подземных вод в юго-западных штатах. Был использован сельскохозяйственный потенциал засушливых земель. Водные практики, разработанные для умеренного климата, могут не подходить для засушливых территорий. По экологическим и экономическим причинам необходимо пересмотреть проблемы, существующие на засушливых землях, а также в пустынных районах. Данная глава имеет следующее содержание.

1. Оценка засушливых и пустыноподобных земель, оценка взаимодействия песка и теплоты, песка и ветра и песка и воды.
2. Разработка методик увеличения подачи воды.
3. Сокращение спроса на водоснабжение, а также предложение единой системы мер для борьбы с опустыниванием.

18.2. ХАРАКТЕРИСТИКА ПУСТЫНЬ И ОПУСТЫНИВАНИЯ

18.2.1. Определение

Пустыня определяется как пустынная, незанятая или необрабатываемая территория. В последние годы термин «опустынивание» как производная слова «пустыня» используется во всем мире. Опустынивание может быть определено как уменьшение или разрушение биологического потенциала земли, которое может в конечном итоге привести к условиям, подобным тем, что существуют в пустыне; пастбища перестают производить, засушливое земледелие перестает работать, а орошаемые поля заброшены из-за засоления, заболачивания или какой-либо другой формы ухудшения состояния почвы. Опустынивание является классическим примером процесса, описанного в статье «Трагедия общин» (Hardin, 1968) Как показано на рисунке 18.1, опустынивание – это процесс самоускорения, «питающийся собой», и по мере его продвижения затраты на реабилитацию растут экспоненциально (Eckholm и Brown, 1977; Biswas и Biswas, 1980).

Пустыня, как определяют инженеры-педологи (HRB, 1957), представляет собой регион, в котором не хватает влаги, достаточной для поддержания растительности, характерной для других районов примерно той же широты и необходимой для поддержания обитания человека. В пустыне часто растут кактусы, травы, мескит и другие кустарники. Пустыня не обязательно является равниной, она часто содержит резкие откосы и песчаные дюны, общие для

засушливых районов, или объекты вулканического происхождения. Пустыня может включать в себя множество топографических особенностей, часто значительных различий в высоте.

8.2.2. Пустыня и цивилизация

Краткий обзор истории показывает нам много примеров воздействия опустынивания на цивилизации. Цивилизация майя за десятилетия рухнула с пика в 5 миллионов человек с плотностью, сравнимой с плотностью большинства обществ, занятых в сельском хозяйстве, до 1/10 от этого значения. Считается, что причиной этого коллапса является эрозия почвы, снижающая продуктивность пахотных земель. Дополнительные примеры отмечаются в районе Тигра и Евфрата, где ирригационные системы не имели дренажных компонентов, уровень подземных вод постепенно повышался, а затем происходили заболачивание и засоление. Точно так же Северная Африка когда-то была зернохранилищем Римской империи, но Ливия и Алжир теперь импортируют половину своего зерна из Северной Америки. Совсем недавно Турпанская впадина в Китае была повреждена унесенным ветром песком: ветер, превышающий 36 м/с, нес пески, которые полностью погребли все дома в этом районе.

Большинство людей думают, что пустыня вызвана отсутствием осадков; к сожалению, дожди это только часть картины. Существуют четыре основных фактора, которые приводят к развитию пустынной среды:

- низкий уровень осадков;
- высокая температура;
- высокая доля испарения осадков;
- плохое управление земельными ресурсами.



Рисунок 18.1. Схематическая иллюстрация многофакторности опустынивания.

18.2.3. Социально-экономические последствия

Как уже говорилось в разделе 1.7, опустынивание в настоящее время затрагивает около 100 стран. Распространение пустынь угрожает 35 % поверхности земли. Это оказывает большое социальное и экономическое влияние на наше общество. Опасность опустынивания также оказывает косвенное влияние на весь мир через:

- 1) незапланированную массовую миграцию с социально-экономическими и социально-политическими последствиями для соседних стран;
- 2) пыльные бури, которые приводят к глобальной циркуляции твердых частиц, влияние которых на глобальный климат еще не оценено;
- 3) потерю генетических ресурсов растений и животных.

18.2.4. Распространение пустыни

Как пишет Walker (1982), имеются свидетельства того, что примерно треть поверхности земли на этой планете считается пустынной, бесплодной землей со скудными осадками, которые могут поддерживать только редкую растительность и ограниченное население. Большинство пустынных сред расположены вокруг экватора в районах с высокой температурой и отсутствием осадков, как показано на рисунках 18.2 (а и б). Долина Смерти в юго-восточной Калифорнии является наиболее интенсивной пустынной территорией в США. Кроме того, большинство людей считают, что пустыня – это геологический цикл, который имеет естественную причину. Однако эта концепция не является полной картиной, потому что пустыни встречаются во многих полузасушливых регионах. Эти пустыни вызваны поведением человека из-за плохого управления земельными ресурсами и отсутствия систем сохранения почвенных вод. Пустыни создают у нас ложное впечатление, что там «ничего» нет. Это впечатление не соответствует действительности, поскольку пустыни содержат много природных ресурсов, таких как уголь, нефть и редкие полезные ископаемые, в дополнение к восстановлению полезных земель и сельскохозяйственных угодий. В таблице 18.1 показана взаимосвязь между мерами по борьбе с опустыниванием, возможностями восстановления природных ресурсов и необходимыми знаниями из других дисциплин для оценки взаимодействия пустыни и окружающей среды.

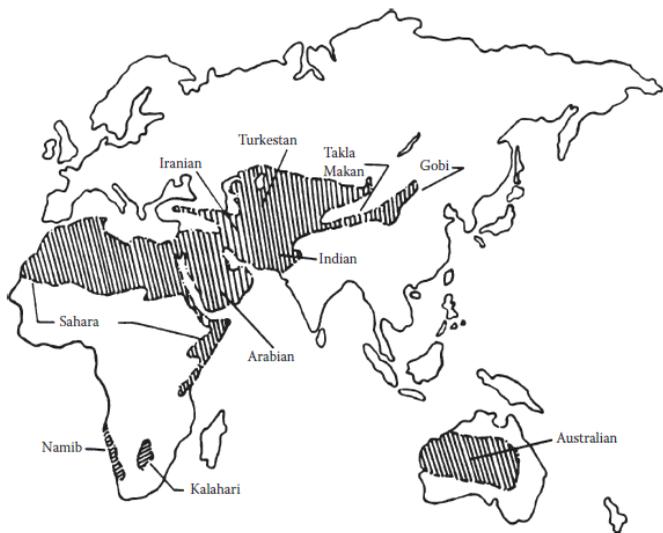


Рисунок 18.2а. Расположение пустынь по всему миру: Азия, Австралия и Африка.



Рисунок 18.2б. Расположение пустынь по всему миру: Северная Америка и Южная Америка.

18.3. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПУСТЫНИ

18.3.1. Климатические особенности

Есть три главных особенности, характеризующих климат пустыни: высокая температура, малое количество осадков и высокие скорости испарения. Общая классификация тропических и пустынных районов по количеству осадков показана на рисунке 18.3. Обзор рисунка 18.3 показывает, что годовой уровень осадков в пустынных районах составляет менее 6 дюймов (15 см). В целом пустынные районы можно разделить на три категории в зависимости от количества осадков. Чрезвычайно засушливые земли имеют как минимум 12 месяцев подряд без осадков и не имеют регулярного сезонного цикла осадков. На засушливых землях выпадает менее 250 мм осадков в год, тогда как на полусушливых землях среднегодовое количество осадков составляет от 250 до 500 мм.

Пустыня получает 90 % падающей солнечной радиации, которая нагревает землю и нижний слой воздуха. Только 10 % отражаются частицами пыли и облаками. Самая высокая температура, когда-либо зарегистрированная на земле, 58°C в тени, была зафиксирована в Африке, в ливийском районе пустыни Сахара. Самая высокая температура, официально зарегистрированная в Долине Смерти, составила 42,5°C. В дополнение к небольшому количеству осадков и высокой температуре, большинство пустынь имеют сильные ветры. Ветер существует в результате конвекции. В дневное время воздух над особенно горячими местами нагревается и поднимается, что позволяет более холодному поверхностному воздуху из других мест перемещаться и занимать свое место. Низкий уровень осадков является главной особенностью пустыни, однако в некоторых местах также идет сильный дождь. Конвекция вызывает большую часть этих осадков в пустынях. Когда столбы воздуха, поднимающиеся над горячими местами, охлаждаются, содержащаяся в них влага может конденсироваться и локализоваться в виде проливных дождей, широко известных как облачные всплески.

Таблица 18.1. Взаимосвязь между мерами по борьбе с опустыниванием, возможностями восстановления природных ресурсов и соответствующими мероприятиями.

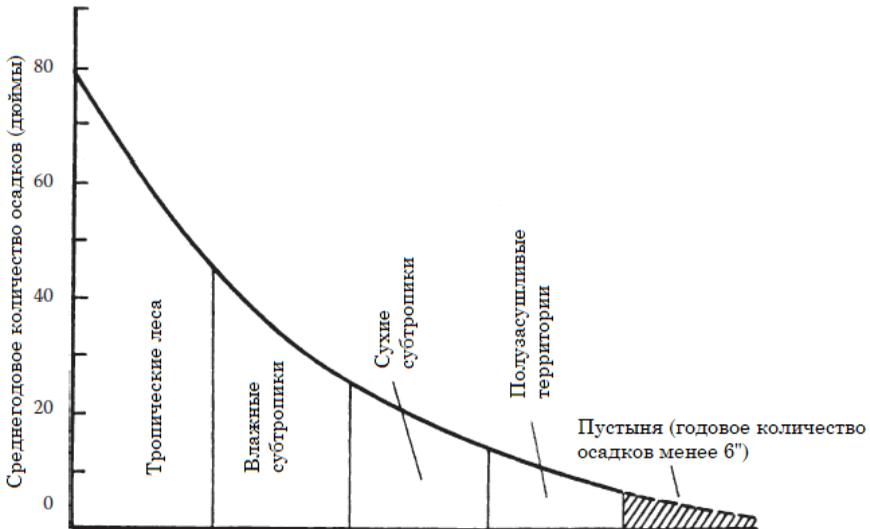


Рисунок 18.3. Общая классификация тропических и пустынных районов на основе годовых осадков.

18.3.2. Вихревая пыль и пыль, переносимая на большие расстояния

Вихревая пыль часто встречается в пустынной местности и называется «пылевыми дьяволами» или «джиннами» (термин на арабском языке) или «вилли-виллиз» (в Австралии). Это явление вызвано высокоскоростными вихрями со скоростью от 20 м/с в центре до 100 м/с на высоте. В некоторых исключительных случаях вихревая пыль может достигать высоты 1,0 км. Она является недолговечным явлением и случайным образом блуждает по поверхности земли в пустынных районах. Вихревая пыль чаще всего наблюдается в равнинных долинах и местах, где встречаются мелкие песчаные дюны или скопления пыли.

Пыль в пустыне может переноситься воздушными потоками на тысячи километров и называется «удаленной пылью». Существует множество зарегистрированных (благодаря осадкам) примеров пыли на больших расстояниях: самые известные пыльные маршруты – из Сахары до Британских островов («красный дождь»); от Западной Африки до Майами, от Монголии до Гавайев и от Украины до Швеции (Allan и Warren, 1993).

18.3.3. Животные, деревья и прочая растительность

Растительность в пустынях является прямым отражением сухого климата. Интенсивный солнечный свет может повредить пигменты, а высокие температуры могут нарушить биохимию клеток. В общем, у пустынных растений в листьях более низкая плотность устьиц, благодаря чему они сохраняют воду. Большая часть растительности не является повсеместной, она имеет тенденцию обитать только в определенных местах. Она включает невысокие кустарники, растущих довольно далеко друг от друга, с голыми участками между ними. Такая структура растительности способствует активному перемещению отложений как ветром, так и движущейся водой. Некоторые пустынные растения активны только в течение ограниченных периодов. Они известны как однолетние и эфемерные, среди них есть каменистые розы, маки и черноподы. Корневые системы пустынных растений часто бывают чрезвычайно глубокими, они находят воду под поверхностью, чтобы восполнить свою потерянную влагу. Дальнейшее обсуждение стабилизации песчаных дюн растительностью или деревьями будет обсуждаться в разделе 18.6.

Животная жизнь в пустыне полностью зависит от растительной жизни. Только зеленое растение может производить органические продукты питания из неорганического материала (углекислого газа, воды и солнечной энергии). Мир пустынных животных – сложное сообщество; некоторые едят растительную пищу напрямую, некоторые едят друг друга. В пустыне есть две фазы роста: пышный период после дождя и длительная засуха, когда единственными доступными продуктами питания являются стебли растений, корни, устойчивые к засухе листья и семена, сброшенные на землю. Детали поведения пустынной флоры и фауны приводятся в работах Leopold (1980), Wichens (1985) и Allan и Warren (1993). Геологические и геотехнические аспекты пустынной среды даны в работах Longwell и соавторов (1969) и Doehring (1981).

18.4. ХАРАКТЕРИСТИКА ПУСТЫННЫХ ПОЧВ

18.4.1. Профиль пустынных почв

Профиль пустынного грунта состоит из трех основных слоев: (1) поверхностный слой покрывает пустынная корка и пустынный панцирь, (2) основная часть поверхностного слоя представляет собой песок или песчано-гравийный слой и (3) подземный слой. Типичный профиль почвы показан на рисунке 18.4.

18.4.2. Пустынная корка и пустынный панцирь

Поверхностные почвы в пустынном регионе имеют четыре отличительные характеристики: (1) эта поверхностная пыль содержит различные составляющие из обломков породы, с которыми она смешивается, (2) пустынные районы менее влажны, а пустынные почвы менее химически изменены, чем почвы во влажных регионах, (3) из-за нехватки воды и процесса выщелачивания (раздел 5.6) в пустынных районах почвы, как правило, более соленые, чем во влажных регионах, (4) из-за того, что химический эффект в пустынных почвах меньше, они сохраняют гораздо больше свойств от материнских пород.

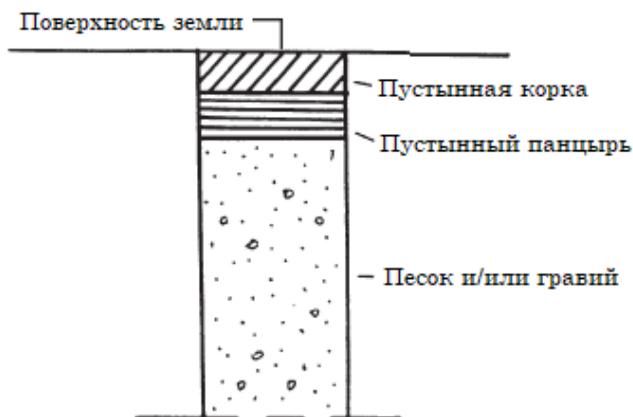


Рисунок 18.4. Типичный профиль пустынной почвы.

18.4.2.1. Пустынная корка

Самым верхним слоем на многих поверхностях пустынных скалах является тонкая темная поверхностная патина, известная как пустынная корка. Большинство пустынных корок очень старые, но некоторые были сформированы недавно. Причины и формирование пустынной корки все еще точно неизвестны. Ранние геоморфологи считали, что исчезновение пустыни вызвано процессом испарения, который уносит железо и марганец из нижележащих слоев породы. Некоторые ученые нашли доказательства того, что в некоторых пустынных

корках элементы удаляются и фиксируются лишайниками и бактериями. Пустынная корка была найдена на скале в Синайской пустыне. Покрытие коркой занимает тысячи лет. Пустынная корка была обнаружена на древних наскальных рисунках, например, в австралийской пустыне (Allan и Warren, 1993).

18.4.2.2. Пустынный панцирь

Самый верхний слой большинства пустынных почв состоит из угловатых камней, известных как пустынные панцири. Пустынный панцирь представляет собой плотный слой; большинство транспортных средств могут двигаться по этому слою, не развивая глубину колеи. Пустынный панцирь находится в алжирской Сахаре. Вертикальные камни выровнялись по мере того, как почва расширялась и сжималась, когда она подвергалась циклам смачивания–высыхания и нагрева–охлаждения. Различия между пустынной коркой и пустынным панцирем показаны на рисунке 18.4.

18.4.3. Подповерхностный слой почвы

Почва под пустынным панцирем в большинстве случаев содержит растворимые соли. Во влажных местах эти соли полностью вымываются. Однако в пустынных районах наблюдается последовательность этих скоплений. Выделяют три отдельные группы.

1. Очень сухая пустынная почва; например, пустыня Сахара имеет слой соли (хлорид натрия, NaCl).

2. В слегка влажной зоне, такой как южный Тунис и часть Нью-Мексико, вымываются поваренная соль и гипс (дигидрат сульфата кальция, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), образуя горизонт почвы.

3. На более влажных краях пустыни (большинство районов, граничащих со Средиземным морем, большие полосы Австралии и юго-запад США) подземный слой почвы образован калькретами (карбонат кальция, CaCO_3), из которых выщелачиваются обычная соль и гипс.

У некоторых пустынных почв есть другие твердые подземные слои или горизонты, которые происходят из-за более влажного прошлого. Эти слои включают латериты (с высоким содержанием железа) и силикаты (с высоким содержанием кремнезема).

18.4.4. Пойменная почва в пустынном регионе

В нижних частях пустынных ландшафтов в этих районах существуют два основных типа почв.

1. В некоторых полувлажных землях, где не так много соли, кремнезем вымывается в водосборных дренажных смесях и объединяется в органические типы глины черного цвета, известные как вертисолы, которые также образуются в результате разрушения базальтовых пород в полувлажных условиях (HRB, 1957). Они очень плодородны при орошении и, например, поддерживают выращивание хлопка на Деканском плато Индии и в центральном Судане.

2. Второй тип почвы далек от плодородия. В иле, откладываемом реками или ручьями, соль может быть выведена на поверхность капиллярным воздействием из уровня воды в нескольких метрах ниже поверхности земли. Когда поверхностная вода испаряется, остаточные кристаллы соли остаются на поверхности. Этот вид засоления (раздел 13.11) происходит с угрожающей скоростью во многих ирригационных схемах, где уровень грунтовых вод был слишком близок к поверхности в результате интенсивного использования воды. Сегодня засоление активно во многих странах и представляет опасность для любой ирригационной системы в засушливых районах мира.

В целом, многие пустынные почвы имеют галечную поверхность, созданную частично, когда ветер удаляет мелкие зерна, частично, когда случайные штормы вымывают зерна, и частично, когда галька поднимается на поверхность, когда почва интенсивно нагревается и охлаждается. Полевые наблюдения, проведенные автором в течение многих лет, показывают следующее: египетская пустыня Сахара образована в основном из мелкого песка, а поверхностные слои очень твердые. Согласно геологическим отчетам, это признаки того, что слои соли (хлорид натрия) находятся в поверхностных слоях. Однако в Синайской пустыне смешаны песок и гравий. В большинстве районов пустыни Гоби имеются гравий, валуны и галька. Как сообщают Allan и Wagen (1993), имеются признаки того, что подземные слои в Тунисе и в части Нью-Мексико относительно мягче, поскольку поваренная соль и гипс вымываются, образуя почвенный горизонт. С геотехнической точки зрения, почвенный покров пустыни состоит в основном из песчано-гравийной смеси, ила и глины, как обсуждалось в главе 3. Однако песок является основным материалом в пустынной местности.

18.4.5. Наводнения

Дождь в засушливых районах непредсказуем. Причина непредсказуемости вызвана местными условиями и может быть объяснена с точки зрения гидрологии. Указывается, что большинство пустынь расположены под полупостоянными антициклонами, в которые влажный воздух, дождевые фронтальные системы или тропические циклоны могут проникать лишь изредка. Когда это происходит, быстро поднимающийся горячий воздух пустыни, который по мере подъема охлаждается и конденсируется, вызывает сильно локализованные осадки.

В районах с достаточным количеством растительности и толстым слоем почвы большая часть воды, образующаяся в результате ливня, может поглощаться. В засушливых землях поверхностные слои насыщаются гораздо быстрее. Как обсуждалось в разделе 7.4, если интенсивность дождя больше, чем инфильтрация и перколяция, поверхностный сток быстро движется вниз по холмам, вызывая внезапные наводнения. Внезапные наводнения несут огромные количества осадков, и это может быть проблемой во многих реках.

18.5. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПУСТЫННЫХ ПЕСКОВ И ТЕПЛА

18.5.1. Общее обсуждение

Поверхность земли в пустыне получает 90 % падающего солнечного излучения, которое нагревает землю и нижний слой воздуха. Напротив, влажные земли поглощают 40 % падающей солнечной радиации. Оставшаяся солнечная радиация на влажной земле рассеивается различными способами: 30 % отражается поверхностью воды и земным покровом, 10 % – частицами пыли и 20 % – облаками. Ночью пустыня становится холодной, потому что 90 % тепла, генерируемого солнечной радиацией, уходит обратно в атмосферу (Anthes и соавторы, 1978). Было показано, что температуры в пустынных районах изменяются несколько равномерно, отражая как годовой, так и суточный циклы солнечной радиации. На эти регулярные циклы накладываются колебания переменной длительности и амплитуды, создаваемые изменением климатических условий. Сезонные колебания температуры воздуха и грунта в пустыне Невада показаны на рисунке 18.5. На рисунке 18.5 показано, что температура грунта остается постоянной на глубине ниже 15,2 м от поверхности земли (Chaney и соавторы, 1983).

18.5.2. Термическое сопротивление пустынного песка

На термическое удельное сопротивление почвы влияют ее насыщенность, пористость и в меньшей степени ее минералогия. Влияние насыщения на тепловое сопротивление почвы из пустыни Невада показано на рисунке 18.6. На рисунке 18.6 показано, что как для песка, так и для глины повышение уровня насыщения приводит к уменьшению теплового удельного сопротивления. Изменение теплового сопротивления, показанное на рисунке 18.6, демонстрирует, что, в общем, чем выше пористость, тем больше термическое сопротивление. Взаимосвязь между удельным термическим сопротивлением и пористостью песка и глины в лабораторных условиях представлена на рисунке 18.7. Диапазон *in situ* состояния пустынного песка также показан на рисунке для сравнения. Объяснения характера взаимодействия песка и тепла в поле тепловой энергии обсуждались в главе 8.

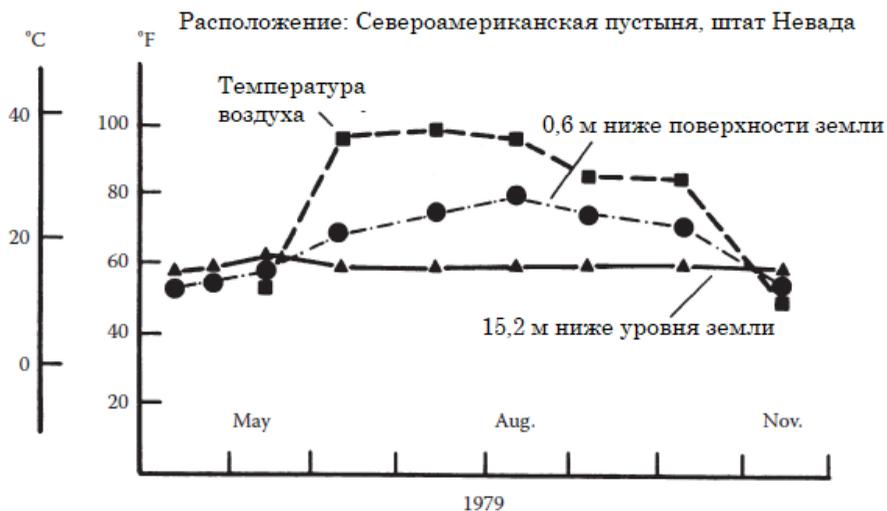


Рисунок 18.5. Сезонные колебания температуры воздуха и грунта в пустыне Невада (по Chaney, R. C. et al. [1983], ASTM Geotech. Testing J., v. 6, n. 4, pp. 220–225. С разрешения ASTM).

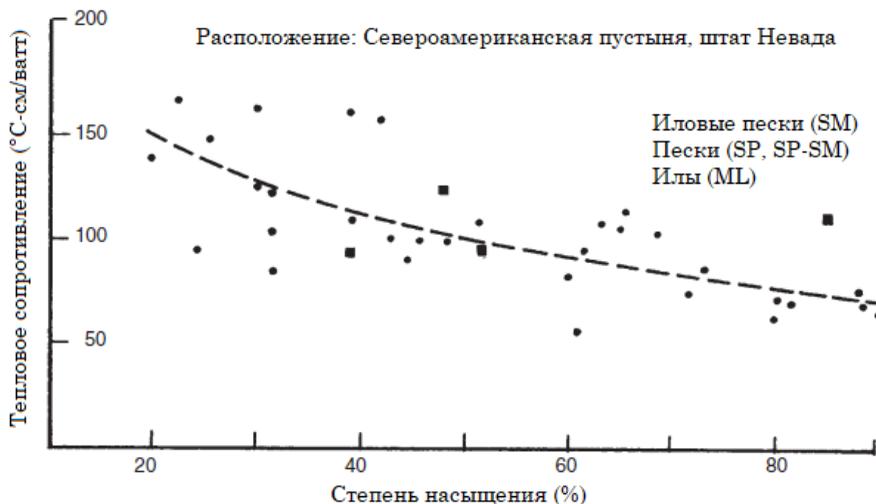


Рисунок 18.6. Изменение теплового сопротивления в зависимости от уровня насыщения (по Chaney, R. C. et al. [1983], ASTM Geotech. Testing J., v. 6, n. 4, pp. 220–225. С разрешения ASTM).

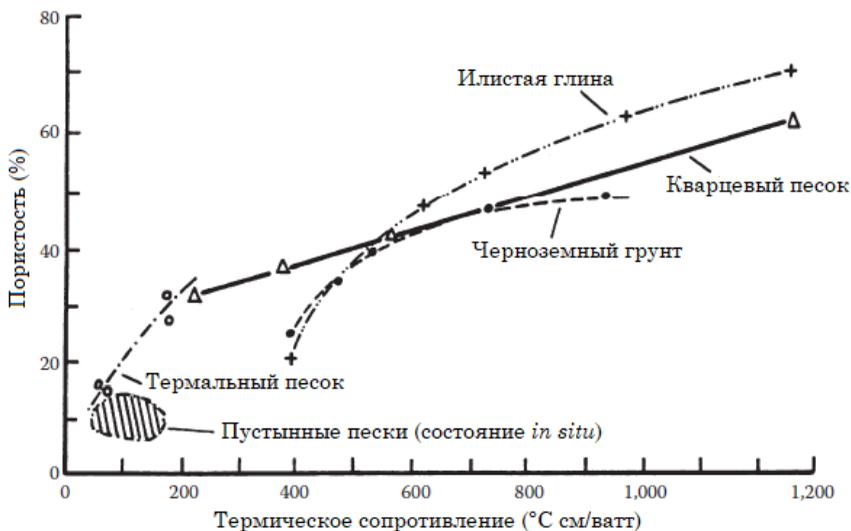


Рисунок 18.7. Зависимость термического удельного сопротивления от пористости песка и глины.

18.6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЕСКА И ВЕТРА В ПУСТЫНЕ

18.6.1. Типы ветров и их причины

Преобладающим эрозионным фактором в пустынной среде является сочетание песка и ветра. Поэтому взаимодействие песка и ветра имеет решающее значение. В пустынном регионе ветер доминирует над песком пустыни. Характеристики взаимодействия песка и ветра являются критической характеристикой и должны быть тщательно изучены.

18.6.2. Механизмы взаимодействия песка и ветра

Как показано на рисунке 18.8, существуют три возможных механизма данного взаимодействия.

1. Свободные частицы песка и ила, собранные ветром и переносимые с одного места на другое. Этот механизм показан на рисунке 18.8a, где две частицы песка в воздухе ударяются друг о друга.

2. Поднятые ветром частицы песка ударяются о гальку или валуны на земле, в результате чего дополнительные частицы ударяются о другие частицы песка на земле, заставляя частицы песка на земле подпрыгивать, как показано на рисунке 18.8b.

3. Аналогично случаю 2, но частиц песка на земле меньше. Высота и расстояние перемещения в случаях 2 и 3 будут разными, в случае 2 перемещение будет дальше и выше.

18.7. ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕСОЧНЫХ ДЮН

18.7.1. Общее обсуждение

Направление ветра и его скорость также важны для мер по борьбе с опустыниванием, потому что направление и скорость ветра будут контролировать структуру песчаных дюн. Существуют четыре основных типа песчаных дюн, вызванных ветром, как пишут Longwell и соавторы (1969), а именно поперечные, продольные, звездные и бархановые узоры. Breed и Grow (1979) разработали систему классификации эоловых песчаных объектов, основанную на общем перечне пустынь, которые можно увидеть на изображениях, сделанных со спутника «Ландсат». Дюны классифицируются в соответствии с их внешними формами и относительным положением поверхностей скольжения, а крутые склоны обычно находятся на одной или нескольких сторонах дюны. Песчаные дюны классифицируются как:

- 1) линейные (прямые, вытянутые, продольно-симметричные песчаные гребни);
- 2) полумесяцы (серповидные насыпи или гребни)
- 3) куполообразные (полукруглые насыпи без скользящих граней);
- 4) звездообразные или параболические;
- 5) нерегулярные пятна эолового песка без поверхностей скольжения (классифицируются как листы песка);

6) резко очерченные удлиненные песчаные пятна, называемые полосами.

Walker (1982) утверждал, что система классификации Breed и Grow, имеющая глобальное применение, выходит за рамки региональных языковых барьеров.

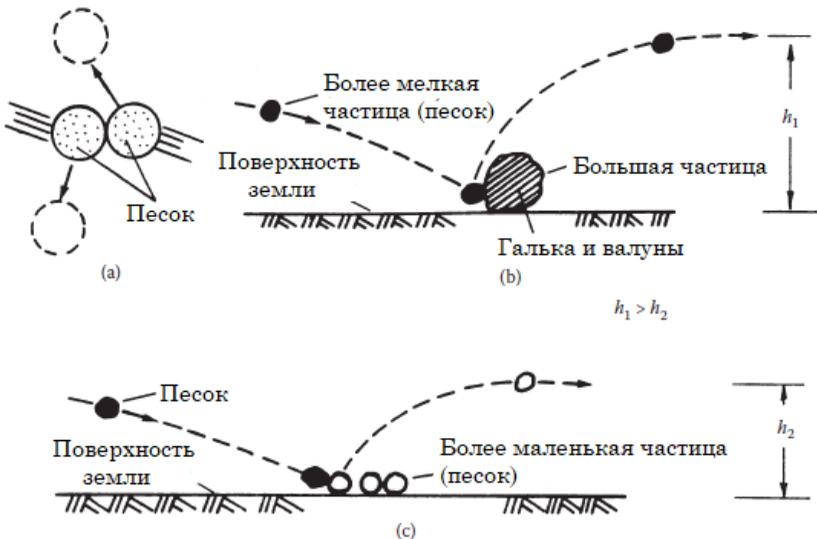


Рисунок 18.8. Взаимодействие песка и ветра, связанное с размером частиц в пустынной среде: (а) взаимодействие песка и ветра в воздухе, (б) взаимодействие более мелких частиц с более крупными частицами, (с) взаимодействие более крупных частиц с более мелкими частицами (по Longwell, C. R. et al. [1969] and Fang, H. Y. and Chaney, R. C. [1987], Proc. 1st. Int. Symp. Environ. Geotechnol., Enviro Publ. Co., Bethlehem, PA., v. 2, pp. 258–288).

18.7.2. Типы песчаных дюн и причины их образования

Выделяют несколько типов песчаных дюн. Как обсуждалось в предыдущем разделе, некоторые причины их образования можно объяснить следующим образом.

1. *Поперечные дюны.* Эти дюны являются продуктом умеренных однонаправленных ветров, которые перемещают только легкий или рыхлый песок. Воздушные вихри сбрасывают в сторону более тяжелые зерна, которые имеют тенденцию образовывать гребни.

2. *Продольные дюны.* Эти дюны возникают, когда более сильные однонаправленные ветры перемещают как мелкие, так и крупные частицы песка, разрезая длинные желоба параллельно пути ветра.

3. *Звездообразные дюны.* Эти дюны образуются в местах, где ветер дует со всех сторон. Звездообразные дюны остаются неподвижными.

4. *Барханные дюны.* Они образуются там, где песка относительно мало. Форма полумесяца является результатом однонаправленного ветра, переносящего песок с большей готовностью по низким концам дюны, чем по центру.

В дополнение к этим типичным образцам песчаных дюн существует множество других форм песчаных дюн, наблюдающихся в разных местах и обсуждаемых во многих указанных работах. Всестороннее обсуждение пустынь Северной Америки от Орегона до Мексики дает Findley (1972) и MacMahon (1985); пустыня Сахара рассматривается в работе Gautier (1953); Такламакан и Гоби – в работах Zhu (1987), Zhu и соавторов (1980); Walker (1982); Allan и Warren (1993) и других.

С инженерной точки зрения, когда мы строим дома, шоссе или железные дороги, копаем канаву или сажаем дерево в пустынных районах, мы должны знать преобладающее направление ветра в конкретной пустыне; в противном случае песчаная дюна придет и уничтожит все, если не будет обеспечена надлежащая защита. Чтобы предотвратить это, мы должны понимать характер взаимодействия песка и ветра.

18.7.3. Характеристики движения песчаных дюн

Имеется очень мало экспериментальных данных о характере взаимодействия песка и ветра в условиях *in situ*. Рисунок 18.9 получен из опубликованных данных по пустыням Такла-Макан и Гоби в Китае. Движение песчаных дюн в юго-западной части Пишана в пустыне Такламакан показано на рисунке 18.9а. Данные указывают на то, что с мая 1961 года по июль 1962 года песчаные дюны переместились более чем на 60 метров. На рисунке 18.9b представлены маршруты движения песчаных дюн. Рисунок 18.9c показывает поперечное сечение движения песчаной дюны. Движение частиц песка, а также маршрут движения песчаных дюн обусловлены не только скоростью и направлением ветра, но также размером частиц, плотностью, степенью насыщения, равно как и местными условиями окружающей среды, такими как растительность, холмы и окружающие структуры.

Движение песка можно описать как ползучее или прыжковое движение. Движение частиц песка у поверхности земли, вызванное ветром, называется ползучестью. Прыжковое движение (рисунок 18.8с) – это динамическое действие,

когда движущаяся песчинка ударяется о другую песчинку на поверхности земли. Напротив, ползучее движение – это горизонтальное движение песка. Начало ползучего или прыжкового движения в зависимости от содержания песка и скорости ветра показано на рисунке 18.10а. Это демонстрирует, что при постоянной скорости ветра начало ползучего движения начинается при более низком содержании песка, чем при прыжковом движении. Скорость движения песчаных дюн как функция скорости ветра показана на рисунке 18.10b. Это демонстрирует, что скорость движения песчаных дюн увеличивается с увеличением скорости ветра. Скорость ветра на рисунках 18.10а и b измерялась на высоте 2 м над поверхностью земли.

Высота от поверхности земли как функция содержания песка и скорости ветра показана на рисунке 18.11а. Это демонстрирует, что линейная связь существует для всех трех случаев. Кроме того, на высоте 3 см над поверхностью земли одинаковое содержание песка существует для всех изученных скоростей ветра (точка А на рисунке 18.11а). Высота песчаной дюны в зависимости от движения в метрах в год как функция местоположения показана на рисунке 18.11b, который демонстрирует, что чем больше высота песчаной дюны, тем сильнее движение. На рисунке 18.11b также показано, что скорость перемещения к высоте дюны является функцией местоположения.

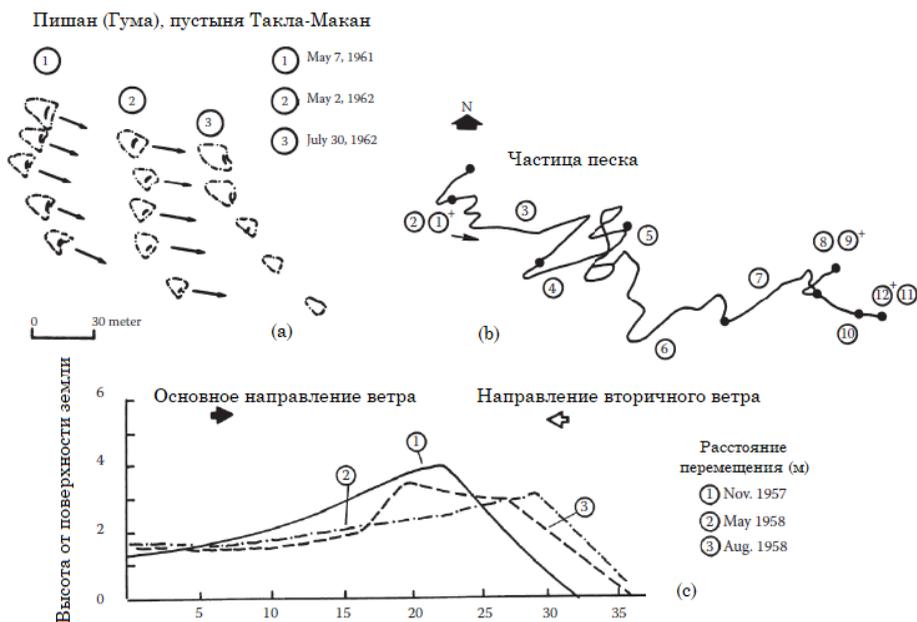


Рисунок 18.9. Характеристики движения песчаных дюн: (а) направление движения частиц песка, (б) маршрут движения песчаных дюн, (с) поперечное сечение движения песчаных дюн.

Расстояние перемещения песчаных дюн также можно оценить по следующему уравнению (Liu, 1960; цитируется работа Zhu и соавторов, 1980):

$$D = Q/\gamma H \quad (18.1)$$

где D – расстояние перемещения песчаной дюны в единицу времени, Q – количество песка, проходящего через единицу ширины в единицу времени, γ – удельный вес песка, H – высота песчаной дюны.

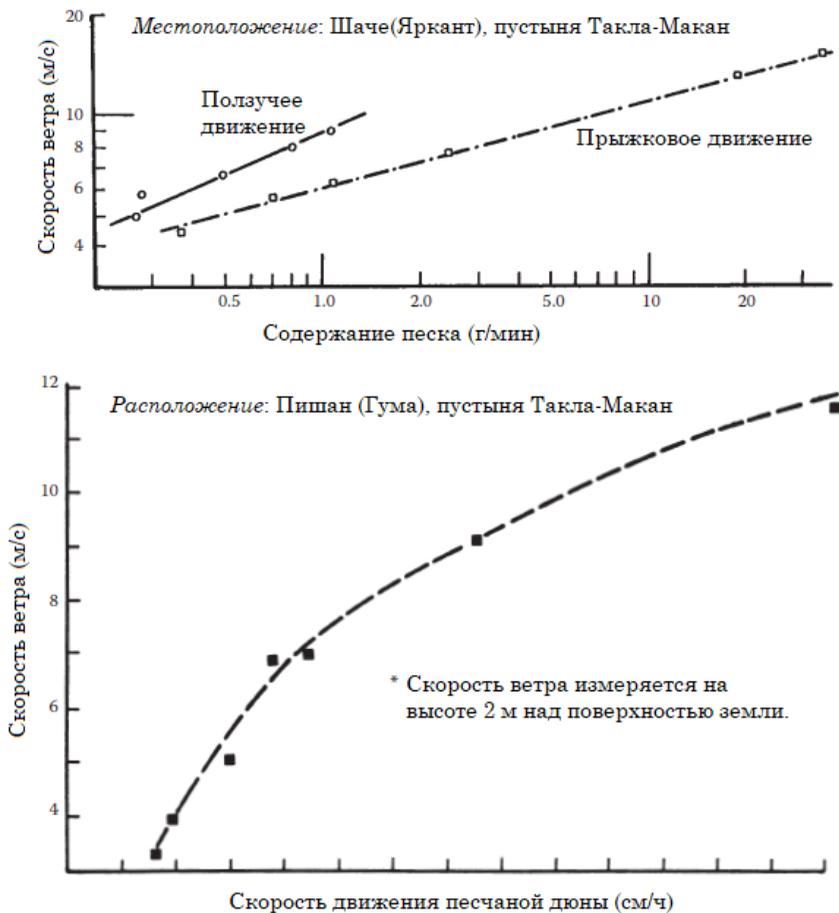


Рисунок 18.10. Взаимодействие песка с ветром: скорость ветра в зависимости от (а) содержания песка в воздухе и (б) скорости движения песчаной дюны (по Wu et al. [1965]; cited by Zhu, Z. D. et al. [1980], Desertification in China, Chinese Academy of Science, Desert Research Institute, 107 p. [На китайском])

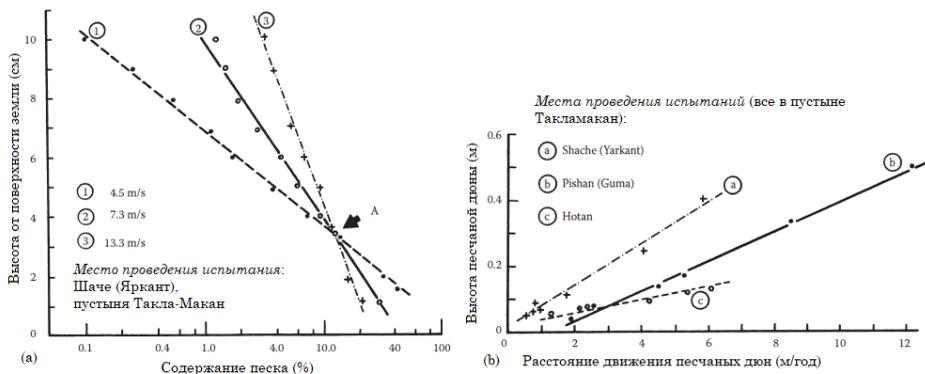


Рисунок 18.11. Влияние высоты песчаной дюны: (а) содержание песка в воздухе и (б) расстояние перемещения песчаной дюны (gJ Wu [1965]; cited by Zhu, Z. D. et al. [1980], Desertification in China, Chinese Academy of Science, Desert Research Institute, 107 p. [На китайском]).

Рисунок 18.12 также показывает высоту поднятия песка в зависимости от скорости ветра. Числовые показатели, указанные на рисунке, равны содержанию песка в процентах. Для данной скорости ветра содержание песка варьировалось в зависимости от высоты.

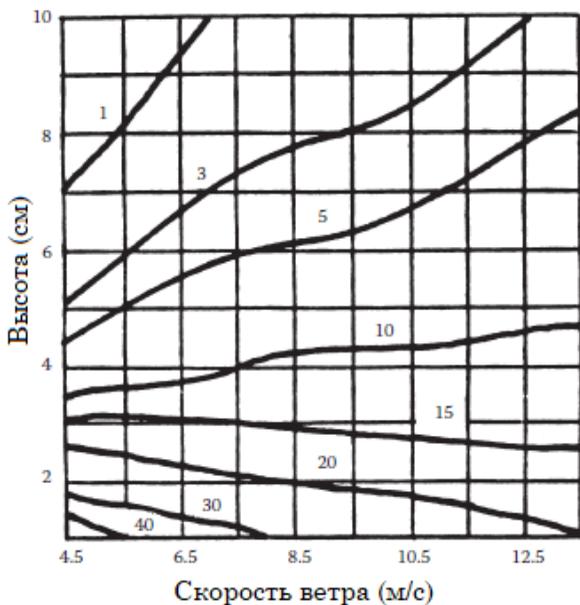


Рисунок 18.12. Высота в зависимости от скорости ветра с равным содержанием песка в воздухе (по Zhu, Z. D. et al. [1980], Desertification in China, Chinese Academy of Science, Desert Research Institute, 107 p. [На китайском]).

18.8. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПУСТЫННЫХ ПЕСКОВ И ВОД

18.8.1. Характеристика воды в пустынном регионе

Без воды нет жизни, поэтому вода в пустыне имеет большое значение. Как получить воду и как ее сохранить, когда она получена, – вот темы следующего раздела. В пустынном регионе годовое количество осадков составляет менее 15 см (рисунок 18.3). Количество осадков в Долине Смерти составляет около 1–2 дюйма в год, и прошли годы прошли без осадков. Отчеты из пустыни Атакама на севере Чили указывают на периоды более 10 лет подряд без дождя.

Вода в пустынных районах встречается в различных формах. Периодически идут проливные дожди, широко известные как облачные всплески. Поверхностные воды, образующиеся в результате такого рода дождей, исчезают в результате испарения, инфильтрации (раздел 7.4) и поверхностного стока. В пустыне реголит обычно рыхлый и сухой, а где голый, он легко размывается. Бассейны, образованные в результате разломов и других движений земной коры, играют большую роль в определении общего ландшафта земли в засушливой области – больше, чем влажной, потому что лишь в редких случаях воды достаточно для заполнения бассейнов. В западной части США такой бассейн является эфемерным мелким озером, называемым озером Плайя, и такое часто можно увидеть в засушливых регионах. Одно из самых известных озер Плайя называется «Лоп Нор», оно расположено в пустыне Такламакан, Китай.

18.8.2. Поверхностные воды: озера и ручьи

Многие озера Плайя содержат высокую концентрацию солей в своих водах и считаются солеными озерами. Химический характер воды в озере и тип выпадающих осадков зависят от типов горных пород, лежащих в основе бассейна озера. Вообще озера называют различными названиями в зависимости от их химического состава. Например, озера, богатые хлоридом натрия (NaCl), называются солеными озерами, озера, богатые натрием (Na) и карбонатом калия (K_2CO_3), известны как щелочные озера, а озера, богатые сульфатом натрия (Na_2SO_4), называются горькими озерами.

Согласно полевым наблюдениям автора в 1983 и 1985 годах, вокруг районов Урумчи и Турфана имеются многочисленные соленые и пресноводные пруды или озера. Источник пресной воды – растаявший снег с Небесной Горы (Гималаи).

18.8.3. Подземные водные ресурсы

В пустынях, хотя поверхностных вод меньше, подземных рек много. В некоторых регионах имеются богатые резервуары подземных вод. В пустынях Гоби и Такла-Макан большое количество воды получают из талого снега со Небесной горы. Для разработки этих источников воды необходимы новые методы. Использование солнечной энергии для таяния этих снегов является одним из таких методов, который был предложен. Кроме того, также необходимо

будет разработать методологии для транспортировки этих вод из одного места в другое и их повторного использования.

Чем меньше воды, тем больше потребность в эффективном использовании передовых технологий для приобретения и развития систем водоснабжения наряду с реалистичной программой управления ресурсами. Некоторые важные вопросы, связанные с этими методами управления, обсуждаются в следующих разделах. Там, где имеются подземные воды, системы снабжения и подачи поверхностных и подземных вод следует рассматривать в сочетании или совместно для оптимального использования общего источника воды. Снижение испарения воды с поверхности земли также является важным фактором. Поскольку испарение невидимо, оно редко рассматривается как серьезный сток накопленной воды, но ежегодные потери испарения, особенно в пустынных районах, очень велики.

18.8.4. Водные ресурсы и способы их сохранения

18.8.4.1. Общее обсуждение

Там, где имеются подземные воды, системы снабжения и доставки поверхностных и подземных вод следует рассматривать в сочетании для оптимального использования общих ресурсов. Обычно фермеры имеют тенденцию к избыточному орошению при наличии воды. Это может привести к проблемам заболачивания и засоления и вымывания плодородия. С другой стороны, для удаления накапливающихся солей может потребоваться чрезмерное орошение. В этом разделе обсуждаются технологии для улучшения водоснабжения. Таблица 18.2 представляет собой сводную информацию о наиболее часто используемых методах управления водными ресурсами в засушливых и пустынных районах. Другие источники воды включают солнечную дистилляцию, использование спутников и самолетов для обнаружения воды в засушливых землях и увеличение количества осадков.

18.8.4.2. Горизонтальные скважины и горизонтальные стоки

В умеренных регионах некоторыми небольшими источниками часто пренебрегают. Однако в засушливых или пустынных регионах каждая капля воды необходима и ее стоит экономить. Инженеры должны тщательно исследовать источники любого водоснабжения. Горизонтальные скважины (NAS, 1974) являются типичным примером. Во многих отдаленных и засушливых горных районах такие источники являются самыми безопасными и надежными источниками воды. Горизонтальная скважинная система устанавливается в определенных геологических формациях для сбора воды, попавшей в почву или скальные соединения, для ирригации или питья. Принцип горизонтальной скважины такой же, как и у горизонтальных стоков. Поскольку принцип горизонтальных стоков хорошо развит в геотехнике, здесь представлены некоторые знания о горизонтальных стоках. Горизонтальный дренаж – это просто скважина небольшого диаметра, которая пробурена почти горизонтально. В геотехнических применениях эти горизонтальные стоки используются для

удаления подземных вод. Многие из ранних установок были сделаны с помощью дрелей с водяным приводом, известных как «Hydrauger». Кроме того, горизонтальные дренажи часто делаются как часть запланированной стабилизации наклонных склонов во влажном, неустойчивом грунте или используются для корректировки устойчивости грунтовых склонов. Часто горизонтальные водостоки делаются на нескольких уровнях. Было разработано много эффективных методов установки для строительства шоссе и системы укрепления грунта. Эти полезные методы могут также применяться в засушливых и пустынных районах для поисков источников водоснабжения. Конечно, некоторые дополнительные модификации должны быть сделаны, чтобы удовлетворить различные условия.

Таблица 18.2. Управление водными ресурсами в засушливых и пустынных регионах.

Источники воды	Методы сохранения воды
Количество осадков	Сокращение сточных вод
Сбор подземных вод	Дождевая вода собирается с горных склонов
	Сток с сельскохозяйственных объектов
Сбор росы	Орошение соленой водой
Разведка подземных вод	Уменьшение испарения с поверхности воды
	Уменьшение потерь просачивания
Повторное использование воды	Уменьшение испарения с поверхности земли
Сбор соленой воды	Уменьшение транспирации
Сбор воды от таящего снега и льда с высоких гор	Использование солнечной энергии, собранной в пустыне, для таяния снега и льда, а затем использование полученной воды для орошения в пустыне

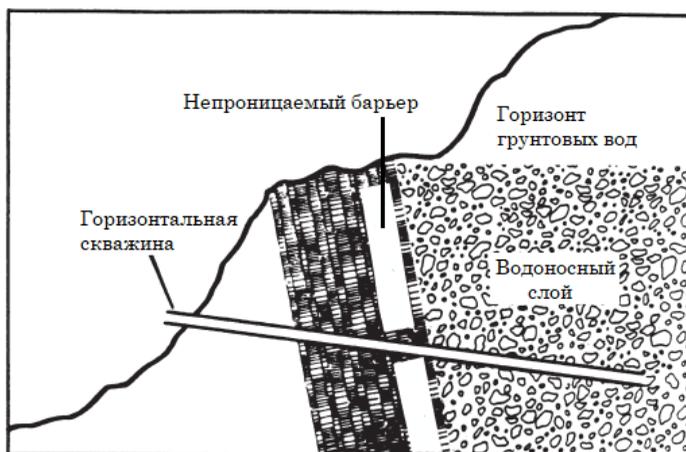


Рисунок 18.13. Типовая подача воды из горизонтальных скважин (по Welchert, W. T. and Freeman, B. N. [1973], cited by NAS [1974], More Water for Arid Lands, NAS Press, Washington, D.C., p. 152).

18.8.4.3. Подземные реки или ручьи

Подземные реки и ручьи являются одним из основных водных ресурсов в пустынном регионе. Геологические данные показывают, что в пустынных районах существует множество скрытых подземных рек или ручьев. Подземная водная система – также важный пункт, который нужно рассмотреть. Подземные водные ресурсы существуют в пустынных районах, но транспортировка этой воды из одного места в другое также важна. Чтобы устранить поверхностное испарение в пустынном регионе, необходимо оценить систему транспортировки подземных вод. Имеется одна такая система, успешно построенная в пустыне Такла-Макан.

18.9. РАСПОЛОЖЕНИЕ ИСТОЧНИКА ВОДОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ АКТИВНОЙ ПЛОСКОСТИ

18.9.1. Общее обсуждение

Метод, основанный на двух активных плоскостях для определения местоположения источника водоснабжения, был успешно разработан Luo и соавторами (1982), и это особенно ценно для обнаружения источников подземных вод в засушливых регионах. На основании полевых наблюдений указывается, что наиболее вероятным источником подземных вод является то место, где масса породы будет деформирована или будет иметь место разрушения. Также предполагается, что места деформации и разрушения обычно происходят вдоль несплошностей массива горных пород. Следующие процедуры предложены Luo и соавторами (1982, 1984), чтобы оценить возникновение, характеристики и взаимодействия этих разрывов.

18.9.2. Концепция активных плоскостей

В соответствии с концепцией двух активных плоскостей и на основе многолетних исследований и накопленных данных были созданы 6 типов и 14 эволюционных моделей деформации и разрушения (геомеханические модели) склонов горных пород в магматических регионах.

1. *Простая модель.* Предполагается, что плоскость разрушения является простой формой плоскостей разрывов и структурных слабостей. По сути, она основана на методах предельного равновесия и может быть использована для предварительных исследований различных проблем устойчивости породы.

2. *Модель Хука.* Эта модель для анализа устойчивости горных массивов является широко используемым методом, разработанным Хуком в 1974 году (Ноек и Врай, 1981). Метод основан на разрывах через центр концентрации полюсов в активной плоскости. Существует простая классификация типов повреждений на склонах горных пород, а именно: круговые, плоские, клиновые и опрокидывающиеся разрушения.

3. *Модель Луо*. Модель Луо является относительно новой, теория была подтверждена многочисленными тематическими исследованиями. Краткое описание метода и фундаментальной концепции представлено в следующих разделах.

18.9.3. Процедуры для определения активных плоскостей

18.9.3.1. Определение типов и моделей разрушений

Деформация и разрушение горной массы обычно происходят вдоль разрывов, которые существуют в скалах. Основная идея заключается в том, что разрыв должен определять истинно активную плоскость. Концепция активной плоскости Луо (1984) представлена на рисунке 18.14. Существует пять видов плоскостей: неоднородные, активные, гео-активные, статистически активные и истинно активные.

Следует отметить, что концепция активной плоскости Хука несколько похожа на статистическую концепцию активной плоскости Луо, как показано на рисунке 18.14 [4], однако плоскость Хука представляет собой численный подход, а не статистический подход. На рисунке 18.14 [3] продемонстрировано, что гео-активная плоскость является характерной плоскостью массива горных пород. Если мы обнаружим сотни стыков или трещин с небольшими размерами и различными направлениями в массиве горных пород и разлом на горном склоне, то в этом случае разлом является решающим фактором, способствующим движению склона.

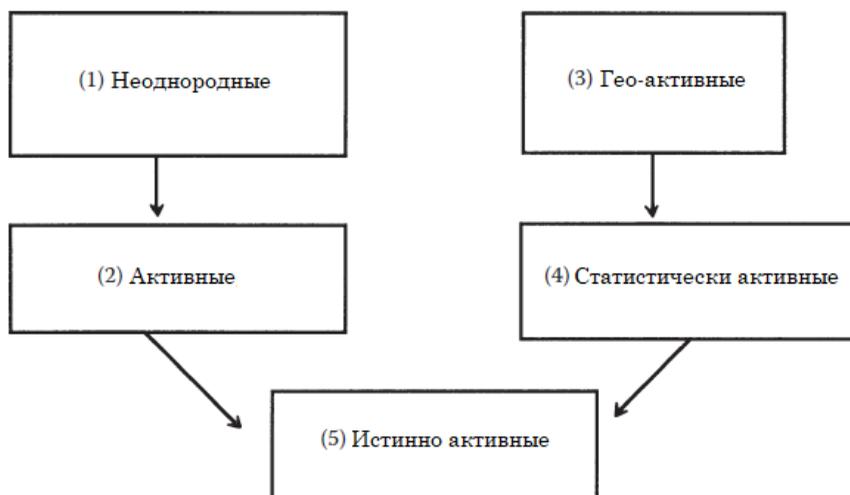


Рисунок 18.14. Концепция активной плоскости Луо (по Luo, G. Y. et al. [1982], Chinese J. Geotech. Eng., v. 4, n. 2, pp. 57–66. [На китайском, с резюме на английском языке]).

Шаг [5] на рисунке 18.14 представляет собой суммирование шагов [1] – [4]. После получения истинно активной плоскости [5] могут быть получены потенциальные типы или модели разрушения (геомеханические модели) массива горных пород и может быть сформулирована правильная математическая или механическая модель. Концепция двух активных плоскостей имеет следующие процедуры для оценки истинно активных плоскостей.

1. Установите программу или процедуру инженерно-геологических исследований активных плоскостей.
2. Установите аналитическую процедуру, основанную на вероятностных методах.
3. Определите 6 типов разрушений и 15 режимов разрушений горной массы.
4. Изучите местные условия окружающей среды, такие как региональная устойчивость горных массивов и наличие воды в зоне трещин.
5. Найдите активные плоскости и определите их верхний индекс (SI).

18.9.3.2. Верхний индекс (SI)

Верхний индекс (SI) используется для определения устойчивости горной массы. Существуют четыре типа SI, предложенные Luo и соавторами (1982, 1984). Краткое обсуждение индекса представлено далее. В соответствии с концепцией предпочтительных плоскостей структурный фактор является наиболее нестабильным фактором, а разрушения на склонах контролируются активными плоскостями. Поскольку в естественном массиве пород существуют различные типы структурных плоскостей, можно использовать геологический возраст в качестве основного фактора для определения SI.

В естественном состоянии конструктивные плоскости, существующие в массиве горных пород, имеют разную степень цементации при раскопках массива горных пород. В таких случаях геологический возраст является решающим фактором. В породном массиве есть два типа разломов.

1. *Возрастной разлом*: разлом, который сформировался при старом геологическом тектоническом движении. Зона разрушения была зацементирована или заполнена твердыми веществами, такими как кварц или известковый цемент.

2. *Неотектонический разлом*: вновь образованный разлом, вызванный неотектоническим движением, зона перелома всегда ослаблена и/или заполнена грязным цементом. Есть три типа неотектонических разломов.

а. *Старый неотектонический разлом*: старый разлом образовался в юрско-меловой период.

б. *Новый неотектонический разлом*: новый разлом образовался в третичном или четвертичном периоде.

с. *Активный неотектонический разлом*: активный разлом образовался в период голоцена (Q_4). Новые и активные разломы из-за их молодого возраста имеют слабую цементацию. Этот тип разломов является важной экологической геотехнической проблемой.

18.10. АНТИДЕЗЕРТИФИКАЦИОННЫЕ МЕРЫ

18.10.1. Общее обсуждение

Меры по борьбе с опустыниванием применялись Китаем с умеренным успехом. Программы в этой стране варьировались от стабилизации песчаных дюн пустынь Гоби и Такла-Макан до посадки деревьев и кустарников и рытья артезианских скважин, до установки дождевальных установок и ирригационных труб в Синайской пустыне. В таблице 18.3 представлены геотехнические аспекты контроля в рамках мер по борьбе с опустыниванием. В основном существуют два основных подхода:

- 1) снижение скорости ветра и уменьшение содержания песка в воздухе;
- 2) уплотнение поверхности песка и придание ему стойкости при воздушно-песчаном взаимодействии.

18.10.2. Предотвращение перемещения песка

Движение песка ветром происходит в нескольких дюймах от поверхности земли. В крайнем случае песок накапливается в массивных дюнах, которые затем могут мигрировать на пахотные земли (Breed и Grow, 1979). В следующих разделах будут обсуждаться стратегии как для стабилизации песчаных дюн, так и для минимизации влияния миграции песка через линии жизни. Стабилизация пустынного песка может быть выполнена химическими или биоинженерными методами. Стабилизация песка в пустыне различными стабилизаторами, такими как известь, цемент и гипс, будет обсуждаться далее.

Проект недорогой конструкции дорожного покрытия для дорог с небольшим объемом в засушливых районах на юге Африки описан Strauss и Hugo (1979). Существуют два доступных источника материала, а именно: бетон и выдувной песок; они сильно различаются по качеству. Кальцит как педогенный материал образуется путем цементации или замены существующих почв путем осаждения карбоната кальция из почвенных вод. Материал может быть идентифицирован как сильно кальцинированные пески. Выдуваемые ветром пески – это песок одного размера, практически все его частицы проходят через сито с отверстиями 2 мм, он непластичен с классификацией почвы AASHTO A-2-4 или A-3. Не более 12 % проходит через сито № 200. На рисунке 18.15 показано увеличение прочности благодаря различным стабилизаторам и содержанию стабилизатора для выдуваемых ветром песков.

Таблица 18.3. Геотехнические аспекты контроля в антидезертификационных измерениях.

Уменьшение скорости ветра и уменьшение содержания песка в воздухе	Методы биологического контроля	Остановить движение песка с помощью задержания Остановить движение песка, посадив деревья Посадка деревьев между песчаными дюнами Поверхностный дерн
	Методы механического контроля	Высокие песчаные барьеры Полупрозрачные барьеры скрытого типа Использование гравия или глины, покрытой слоем песка
Уплотнение поверхности песка для противодействия воздушно-песчаному взаимодействию	Методы химического контроля	Использование различных химических спреев Перемещение песка контролируется химическими методами

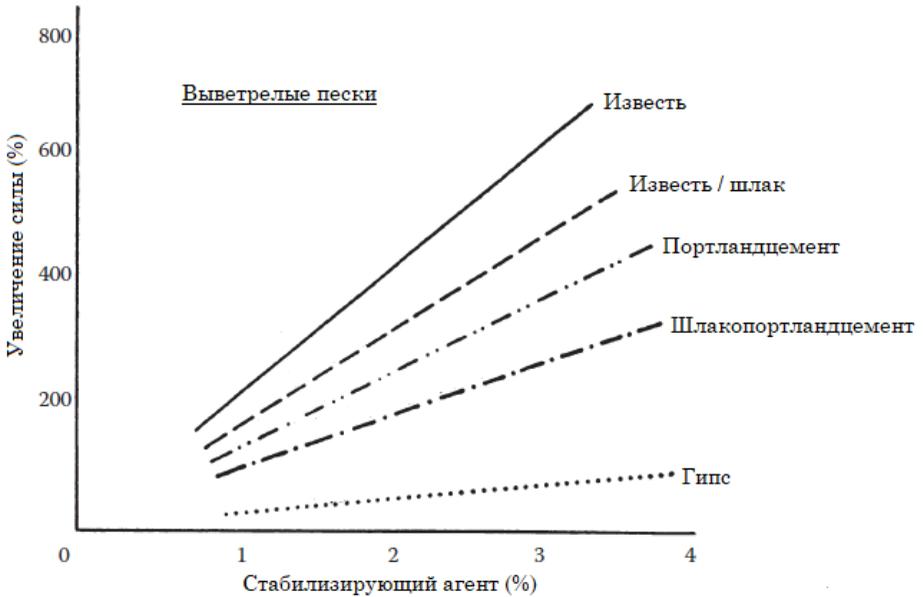


Рисунок 18.15. Изменение прочности выветрелого песка в зависимости от типа и количества стабилизатора (по Strauss, P. J. and Hugo, F. [1979], TRR 702, pp. 208–214).

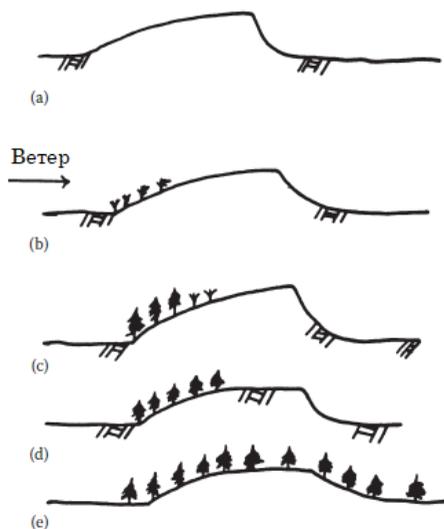


Рисунок 18.16. Биотехническая стабилизация песчаных дюн.

18.10.3. Биотехническая стабилизация песчаных дюн

Стабилизация песчаной дюны показана на рисунке 18.16. Процесс начинается с посадки деревьев вдоль основания дюны для стабилизации в направлении преобладающего ветра, как показано на рисунке 18.16а. Когда эти деревья вырастают, высаживаются новые деревья новой линией ближе к вершине дюны. Когда линия деревьев достигает приблизительно 3/4 высоты дюны, верх дюны выравняется, как показано на рисунках 18.16с и 18.16д. Затем дюна полностью засаживается деревьями, как показано на рисунке 18.16е.

В засушливой среде способность растения к выживанию напрямую связана с его способностью использовать источники воды. По этой причине многие виды засушливых растений используют как боковые корневые системы, так и стержневой корень. Боковые корневые системы играют важную роль в уменьшении сухой плотности верхнего слоя почвы, предотвращая комкование почвы. Корни обеспечивают растительность жизненно важной влагой из подземных источников в сухое время года.

18.10.4. Защита коммуникаций от летучего песка

Техника включает в себя строительство неглубоких траншей глубиной 1–2 фута (0,3–0,7 м) или барьеров из сена параллельно линии жизни, чтобы перехватить транспортировку песка. На рисунке 18.17 показана защита линий жизни от летучего песка. На рисунке 18.18 показана солома, которая используется вдоль открытых стоков для защиты дренажных линий от дрейфующего песка. Фотография была сделана в 1985 году в городе Дуньхуан, большом оазисе вдоль старого Шелкового пути в Китае.

В пустынных районах много песка или гравия, но не хватает других строительных материалов, таких как цемент, вода и древесина.

Подвижная подпорная стена представляет собой тип гравитационной стены. Оболочка разработана для формирования контейнерного типа стены. Стенка или оболочка контейнера изготавливается из пластика или бруса, а затем заполняется доступными материалами, такими как песок или гравий. Этот тип конструкции является временным, подвижным и недорогим элементом.

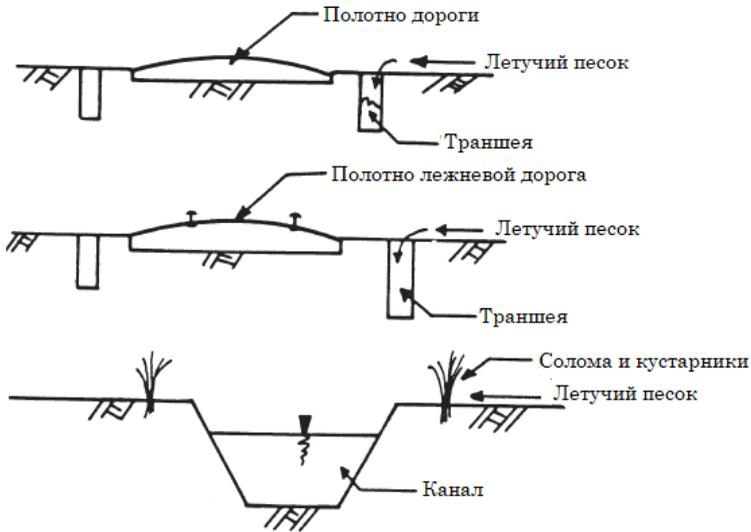


Рисунок 18.17. Защита коммуникаций от летучих песков.



Рисунок 18.18. Солома используется для защиты открытых стоков от дрейфующего песка.

Установка вертикальных барьеров уменьшит содержание песка в воздухе, как показано на рисунке 18.19. В случае проблем с фундаментом из-за глубокого песчаного слоя традиционные методы уплотнения могут быть неэффективными. Следовательно, могут использоваться методы динамического уплотнения (динамической консолидации), как описано в разделе 11.4.



Рисунок 18.19. Сравнение содержания песка в воздухе: (1) без барьеров и (2) с барьерами (по Chu, P. C., et al. [2008], Environ. Int. v. 34, pp. 698–713).

18.11. РЕЗЮМЕ

1. Существуют четыре основных фактора, которые приводят к развитию среды, подобной пустыне: низкий уровень осадков, высокая температура, высокая доля испарения осадков и плохое управление земельными ресурсами.

2. Преобладающим эрозионным фактором в пустынной среде является сочетание песка и ветра. Скорость движения песчаных дюн увеличивается с

увеличением скорости ветра и высоты дюны. Экспериментальные данные приведены для песчано-ветровых взаимодействий.

3. Дано обобщение управления водными ресурсами в засушливых и пустынных районах, включая источники воды и методы водосбережения.

4. Обобщены геотехнические аспекты мер по борьбе с опустыниванием, включая биологические, химические и механические методы контроля.

ПРОБЛЕМАТИКА

18.1. Перечислите наиболее важные факторы, влияющие на опустынивание.

18.2. Большинство людей считают, что в пустыне нет ничего. Как бы вы это прокомментировали?

18.3. Пустыни продолжают расширяться, затрагивая более ста стран. Почему мало кто обеспокоен этой проблемой?

18.4. Подготовьте типичный почвенный профиль и горизонт для пустынных почв.

18.5. Дайте определение следующим терминам и названиям: пустынная корка, пустынный панцирь, Гоби, вихревая пыль, «вилли-виллиз».

18.6. Каковы основные контролирующие факторы для оценки взаимодействия песка и ветра?

18.7. Как животные влияют на водоснабжение?

18.8. Каков механизм воздушного колодца? Это осуществимая концепция или выдумка? Если нет, стоит ли продолжать ее изучение для возможного практического применения?

18.9. Определите две предпочтительные плоскости и скажите, как этот подход может помочь найти источники подземных вод.

18.10. Обсудите основные принципы мер по борьбе с опустыниванием. Почему очень мало инженеров-геотехников интересуются проблемами этого типа?

18.11. Какой бы вы предложили план управления водными ресурсами в засушливых и пустынных районах?

Комментарии и выводы

Почва в своем естественном расположении представляет собой динамическую систему, свойства которой зависят не только от свойств ее составляющих, но также от взаимного расположения и взаимодействия этих составляющих в зависимости от истории системы и динамики ее нынешнего окружения. Размещение фундаментной конструкции или любое другое нарушение в почвенной системе открывает возможности для благоприятных или вредных взаимодействий, которые должны быть предусмотрены и приняты во внимание ответственным инженером. Тяжесть неблагоприятного взаимодействия обычно возрастает с увеличением близости новой поверхности контакта к поверхности почвы, где суточные и сезонные изменения температуры и влажности достигают максимальных значений и где могут накапливаться вредные соли. В то время как структурная чувствительность связных почв и нежелательная химическая активность загрязняющих веществ и проблемных почв хорошо известны, менее известно, что даже «инертные» материалы, такие как пески, могут демонстрировать сильно различающуюся несущую способность в зависимости от их конкретного местоположения, например, пляжный песок и наветренная или подветренная сторона блуждающих дюн в пустынных регионах. Кроме того, в зависимости от режимов осаждения речные и морские отложения и гравий могут быть настолько рыхлыми, что, легко выдерживая статические нагрузки, они становятся макромеритными жидкостями в результате землетрясения.

Этот учебник содержит 18 глав. Он пытается представить синоптическую картину экологической геотехнологии и возможности использования накопленных в рамках нее знаний. Однако следует надеяться, что сведения, содержащиеся в этом учебнике, являются достаточно информативными, чтобы донести до инженеров-геотехников идею о важности экологических аспектов геотехнологии. Примеры, приведенные в текстах, достаточно разнообразны, чтобы проиллюстрировать множество различных областей, в которых знания и методология экологической геотехнологии являются чрезвычайно полезными инструментами в качестве нового измерения для понимания фундаментального поведения почвы.

Однако есть еще один, возможно, даже более важный аспект, который заключается во влиянии типа мышления на разум инженера-геотехника, который должен понимать:

- взаимодействие почвы и окружающей среды;
- взаимодействие почвы, воды и воздуха в окружающей среде;
- явление массопереноса в загрязненной ненасыщенной мелкозернистой почве;
- геоморфологические процессы или влияние старения на свойства почвы и породы.

Надеемся, что эта дополнительная информация и иллюстрация могут помочь в дальнейшем понимании фундаментального поведения почвы, особенно когда почва взаимодействует со сложной локальной средой.

В настоящее время предмет геотехнологии стоит на распутье. Одна дорога все еще догматично следует классической концепции, разработанной К. Терцаги в 1925 году, а другая – экологическим ситуациям, которые бросили вызов этим концепциям и методам анализа поведения почвы в различных условиях окружающей среды, поскольку они не могут эффективно объяснить всю систему почва – вода – явления окружающей среды и взаимодействие почвы и сооружений в современном мире. Ситуация не может быть изменена или исправлена резко за одну ночь, но она должна измениться в конечном счете без большого разрыва между этими двумя направлениями. Чтобы справиться с этой проблемой, представлен комбинированный подход, поэтому теория энергетического поля частиц, предложенная авторами, представлена в этом учебнике. Другими словами, этот учебник представлен со старой структурой, но с новой информацией, добавленной в него по мере необходимости.

Некоторые замечания в этом тексте можно считать противоречивыми для классической механики грунтов. Тем не менее результаты исследований показывают, что экологическая геотехнология может значительно помочь проблемным инженерным проектам. Признание влияния экологического фактора на геотехнологию является основной темой этого учебника.

Приложение 1

<i>AASHO</i>	Американская ассоциация государственных служащих автомобильных дорог (нынешнее название AASHTO)
<i>AASHTO</i>	Американская ассоциация руководителей государственных шоссе и дорог и транспорта
<i>ACS</i>	Американское химическое общество
<i>AEE</i>	Ассоциация инженеров-энергетиков
<i>AGU</i>	Американский геофизический союз
<i>AID</i>	Агентство по международному развитию
<i>AIEE</i>	Американский институт инженеров-электриков
<i>APCA</i>	Ассоциация контроля по загрязнению атмосферы
<i>ASAE</i>	Американское общество инженеров сельскохозяйственного производства
<i>ASCE</i>	Американское общество гражданских инженеров
<i>ASTM</i>	Американское общество по испытанию материалов
<i>BPR</i>	Бюро общественных дорог (нынешнее название FHWA)
<i>BNCB</i>	Британское государственное управление угольной промышленности
<i>CAA</i>	Закон о чистом воздухе
<i>CERCLA</i>	Закон о всесторонней защите окружающей среды, компенсациях и ответственности при ее загрязнении
<i>CWA</i>	Закон о чистой воде
<i>DER</i>	Министерство энергетики и ресурсов
<i>DOE</i>	Министерство энергетики
<i>EPA</i>	Управление по защите окружающей среды
<i>FAA</i>	Федеральное агентство гражданской авиации
<i>FHA</i>	Федеральное управление автомобильных дорог
<i>HRB</i>	Автодорожный научно-исследовательский комитет (нынешнее название TRB)
<i>HRR</i>	Исследования в области автомобильных дорог (текущее название TRR)
<i>ICSMFE</i>	Международная конференция механики грунтов и фундаментостроения
<i>JSMFE</i>	Журнал «Механика и основы почв»
<i>LMER</i>	Исследования экосистем суши и окраин
<i>NCHRP</i>	Национальный кооперативный исследовательский проект
<i>NAS</i>	Национальная Академия Наук
<i>NRC</i>	Национальный научно-исследовательский совет
<i>NSF</i>	Национальный фонд науки
<i>OECD</i>	Организация Экономического Сотрудничества и Развития
<i>OSM</i>	Комитет по открытой добыче полезных ископаемых
<i>PERF</i>	Фонд экологических исследований Пенсильвании
<i>RCRA</i>	Закон о сохранении и восстановлении ресурсов
<i>SSSA</i>	Общество почвоведения Америки
<i>TRB</i>	Совет по транспортным исследованиям
<i>TRR</i>	Отчет по транспортным исследованиям
<i>USBM</i>	Бюро шахт и рудников США
<i>USBR</i>	Бюро США по рекламациям
<i>USDA</i>	Министерство сельского хозяйства США
<i>USGS</i>	Служба геодезии и картографии США

A, a Константа, площадь, длина трещины (см. в разделе 6.3)

	Коэффициент оседания (см. в разделе 15)
<i>A</i>	Активность глины, А-горизонт (профиль почвы), атомный вес, массовое число изотопа (см. в разделе 10), сила притяжения, ампер, число Авогадро, потеря почвы на единицу площади (см. в разделе 14)
<i>E</i>	Ангстрем
<i>атм. рт.</i>	Атмосферное давление
<i>ст.</i>	
<i>а. е. м.</i>	Атомная единица массы
<i>a_v</i>	Коэффициент сжимаемости (см. в разделе 11)
<i>B, b</i>	Константа, ширина
<i>B</i>	В-горизонт (профиль почвы), постоянная Больцмана (см. в разделе 2), объемный модуль
BRIE	Биогеохимические реакции в лиманах
<i>C, c</i>	Константа, спаянность, единица спаянности (см. в разделе 11), С-горизонт (профиль почвы), емкость (см. в разделе 9), хлорирование (см. в разделе 14), Скорость света (см. в разделе 10), шкала Цельсия (см. в разделе 8)
<i>c_r</i>	Остаточная когезия
<i>c'</i>	Эффективная спаянность
<i>C'</i>	Ветровая эрозия (см. в разделе 14)
<i>C_m</i>	Масса теплоемкость (см. в разделе 8)
<i>C_s</i>	Теплоемкость (см. в разделе 8)
<i>C_v</i>	Объемная теплоемкость (см. в разделе 8)
<i>C_{sp}</i>	Удельная теплоемкость
<i>C_{mv}</i>	Массовая теплоемкость
<i>CD</i>	Консолидированный дренажный тест
<i>CE</i>	Уплотняющее усилие
<i>CU</i>	Консолидированный недренажный тест на сдвиг
<i>CI</i>	Интенсивность растрескивания (см. в разделе 11), индекс согласованности (см. в разделе 6)
<i>CT</i>	Компьютерная томография
<i>CBR</i>	Калифорнийский показатель плотности грунта
<i>Ku</i>	Кюри
<i>C_s</i>	Расстояние между поперечными трещинами (см. в разделе 7)
<i>C_v</i>	Молярная теплоемкость при постоянном объеме (см. в разделе 5)
<i>c_c</i>	Индекс сжатия
<i>c_s</i>	Индекс набухания
<i>c_u</i>	Коэффициент однородности
<i>c_v</i>	Коэффициент консолидации (см. в разделе 11)
<i>D, d</i>	Диаметр, расстояние, глубина, толщина, константа, расстояние между ионами и поверхностью (см. в разделе 4)
<i>d</i>	Расстояние смещения (см. в разделе 9)
<i>D</i>	Коэффициент диффузии (см. в разделе 7), D-горизонт (профиль почвы)

D_e	Эффективная глубина (см. в разделе 11)
D_r	Глубина колеи (см. в разделе 15)
D_{10}	Диаметр, при котором 10 % почвы – более мелкого размера (эффективный размер)
D_{60}	Диаметр, при котором 60 % почвы – более мелкого размера
DM	Дипольный момент
DTA	Дифференциально-термический анализ
E	Модуль Юнга, энергия (см. в разделе 10), энергия уплотнения кинетическая энергия (см. в разделе 11), эффективность (см. в разделе 12), общая кинетическая энергия данного шторма (см. в разделе 14), излучаемость, электродвижущая сила (см. в разделе 9.11)
E'	Потери почвы в процессе ветропереноса (см. в разделе 14)
E_a	Энергия притяжения (см. в разделе 4)
E_K	Кинетическая энергия на моль или на частицу (см. в разделе 2)
E_R	Энергия отталкивания (см. в разделе 4)
E_T	Общее содержание тепловой энергии на моль (см. в разделе 5)
ETM	Предустьевая максимальная мутность
e	Коэффициент пустотности, электронный заряд (см. в разделе 4)
e_{min}	Минимальное соотношение пустот
e_0	Начальное соотношение пустот
e_f	Окончательное соотношение пустот
e^-	Электронный заряд
$ЭДС$	Электродвижущая сила
ESU	Электростатический блок
$эВ$	Электрон-вольт
F	Сила, индекс замерзания, Фарад (см. в разделе 5.3), шкала Фаренгейта (см. в разделе 8), процент прохождения через сито № 200 (см. в разделе 3)
F_a	Индекс отрицательных воздушных температур
F_m	Средний индекс замерзания
F_s	Индекс замерзания поверхности, коэффициент безопасности
FS	Коэффициент безопасности
f	Частота, коэффициент трения
f_{vp}	Функция консолидации
g	Грамм
g	Сила тяжести, проводимость (см. в разделе 9)
G	Скорость выделения энергии деформации Гриффита (см. в разделе 6), динамический модуль сдвига (см. в разделе 11)
GI	Групповой индекс (см. в разделе 3)
G_c	Критическая скорость высвобождения энергии деформации (см. в разделе 6)
G_{max}	Максимальный динамический модуль сдвига
G_s	Удельный вес твердых веществ
H, h	Напор, высота, толщина

h_e	Геометрическая высота напора
h_p	Высота гидростатического напора
h_v	Скоростной напор
h_c	Высота капиллярного поднятия
h_x	Высота свободного падения (см. в разделе 11)
H_e	Гидравлический напор (См. в разделе 9)
$HLRW$	Высокоактивные ядерные отходы
I	Индекс эрозии ветра (см. в разделе 14), интенсивность электрического тока, сила тока (см. в разделе 9), интенсивность осадков (см. в разделе 14)
I'	Фактор эрозии почвы (см. в разделе 14)
i	Угол, градиент
i_c	Критический градиент
i_T	Тепловой градиент
i_w	Градиент содержания воды (см. в разделе 7)
i_e	Электрический градиент
I_c	Индекс согласованности (см. в разделе 6), скорость проникновения в трещину (См. в разделе 7)
I_f	Индекс потока
I_L	Верхний индекс пластичности (см. в разделе 6)
I_p, IP	Индекс пластичности
I_s	Коэффициент эрозионности Нолла (См. в разделе 14)
I_t	Число вязкости, показатель прочности
I	Градиент энергии (см. в разделе 7)
$Дж$	Джоуль
K, k	Коэффициент проницаемости
k	Постоянная Больцмана (см. в разделе 2), теплопроводность (см. в разделе 8)
k'	Физическая проницаемость
k^*	Проницаемость и кажущаяся проницаемость (см. в разделе 9)
k_p	Скорость инфильтрации (см. в разделе 7), коэффициент формы пор (см. в разделе 7)
K	Коэффициент эрозии почвы (см. в разделе 14), коэффициент интенсивности напряжения (см. в разделе 6), шкала Кельвина (абсолютная) (см. в разделе 8)
K'	Коэффициент шероховатости поверхности почвы (см. в разделе 14), физическая проницаемость (См. в разделе 7)
K_a	Константа диссоциация вещества как кислоты (см. в разделе 5)
K_c	Вязкость разрушения (см. в разделе 6)
K_e	Коэффициент проницаемости насыщенного грунта (см. в разделе 9)
K_h	Проницаемость в горизонтальном направлении
K_v	Проницаемость в вертикальном направлении
KE	Кинетическая энергия (см. в разделе 2)
K_0	Коэффициент давления грунта в состоянии покоя

<i>K</i>	Коэффициент энергетической проводимости (см. в разделе 7)
<i>KMT</i>	Кинетическая молекулярная теория
<i>KBES</i>	Экспертная система, основанная на знаниях
<i>L</i>	Длина, длина волны, длина проводника, просадка (см. в разделе 15)
<i>L'</i>	Длина незранированного расстояния (см. в разделе 14)
<i>LI</i>	Индекс пластичности (см. в разделе 6)
<i>LL</i>	Верхний предел пластичности
<i>LEFM</i>	Механика линейного упругого разрушения,
<i>LLRW</i>	Низкоактивные ядерные отходы
<i>LMER</i>	Исследование сухопутных экосистем
<i>LRFD</i>	Расчет коэффициента сопротивления нагрузке
<i>LS</i>	Топографический фактор (см. в разделе 14)
<i>M, m</i>	Масса, момент, метр, масса частицы (см. в разделе 10), толщина шва (см. в разделе 15)
<i>m</i>	Экспонента (см. в разделе 14)
<i>mn</i>	Масса нейтрона
<i>mp</i>	Протонная масса
<i>mv</i>	Коэффициент объемной сжимаемости (см. в разделе 11)
<i>M</i>	Молекулярный вес воды (см. в разделе 4), молярность
<i>MES</i>	Модульная экспертная система
<i>MDES</i>	Многодоменная экспертная система
<i>meq, мэкв</i>	Миллиэквиваленты
<i>n</i>	Нейтрон, пористость, количество свай, концентрация электролита (см. в разделе 9)
<i>n_c</i>	Пористость из-за капиллярности (см. в разделе 7)
<i>n_r</i>	Поровое пространство (см. в разделе 7)
<i>H</i>	Ньютон Число Авогадро (см. в разделе 2), количество ударов, количество полос движения (см. в разделе 7)
<i>N_c</i>	Параметр несущей способности (см. в разделе 12), количество продольных швов (см. в разделе 7)
<i>NAPLs</i>	Неопределенная жидкостная фаза
<i>NSF</i>	Отрицательное трение кожи (основания ворса)
<i>OCR</i>	Коэффициент избыточной консолидации
<i>OLC</i>	Оптимальное содержание жидкости
<i>OMC</i>	Оптимальное содержание влаги
<i>p</i>	Протон
<i>P</i>	Сила, нагрузка, давление, среднегодовое количество осадков
<i>PC, ПК</i>	Персональный компьютер
<i>PI</i>	Индекс пластичности
<i>PE</i>	Индекс эффективности осадков (см. в разделе 14)
<i>PL</i>	Предел пластичности
<i>P_u</i>	Емкость

<i>PCC</i>	Бетон на портландцементе
<i>PSI</i>	Индекс чувствительности к загрязнению (см. в разделе 3)
p_c	Давление предварительного уплотнения (см. в разделе 11)
p_o	Давление вскрыши (см. в разделе 11)
<i>nКю/л</i>	Пикокюри на литр
pK_a	Отрицательные логарифмы K_a (см. в разделе 5)
<i>ppm</i>	Частей на миллион
<i>psi</i>	Фунтов на квадратный дюйм
Q, q	Нагрузка, разряд, количество инфильтрации (см. в разделе 7.18), мощность потока, количество тепла (см. в разделе 8.5)
Q_e	Объем вытесненной жидкости из почвы (см. в разделе 9)
Q_{ult}	Предельная нагрузка
q	Поток воды (см. в разделе 7)
q_a	Допустимая несущая способность
q_e	Единица потока (см. в разделе 9)
q_i	Расчетный уровень инфильтрации (см. в разделе 7)
q_u	Неограниченная сила сжатия
R, r	Радиус
r^2	Коэффициент корреляции
r_r	Часть радиуса (см. в разделе 7)
R	Отталкивание, термическое сопротивление (см. в разделе 8)
R_s	Коэффициент усадки (см. в разделе 6)
<i>RBE</i>	Относительная биологическая эффективность
<i>RPISU</i>	Единица отбора проб группы радона
<i>sec</i>	Секунда, прочность на сдвиг при отсутствии образования грунта (см. в разделе 11), всасывание почвенной воды, длина диполей (см. в разделе 4)
<i>PCC</i>	Длина плиты (см. в разделе 7)
s	Крутизна наклона (см. в разделе 14)
s_u	Средняя прочность на сдвиг при отсутствии загрязнения (см. в разделе 16)
S	Прочность на сдвиг, соленость (см. в разделе 14), удельная площадь поверхности (см. в разделе 4), расстояние между сваями (см. в разделе 12), удельная поверхность на единицу объема (см. в разделе 7), коэффициент уклона, степень насыщенности, коэффициент хранения, чувствительность
S'	Чувствительность (см. в разделе 11)
S_c	Увеличение прочности на сдвиг, вызванное консолидацией (см. в разделе 16)
S_N	Подходящее количество
S_r	Остаточная прочность на сдвиг (см. в разделе 11)
<i>SI</i>	Индекс верхнего предела (см. в разделе 18)
<i>SL</i>	Предел усадки
<i>SR</i>	Коэффициент усадки
<i>SP</i>	Удельная энергия (см. в разделе 11)

<i>SAR</i>	Коэффициент адсорбции натрия
<i>SEM</i>	Сканирующий электронный микроскоп
<i>SPT</i>	Стандартный тест на проникновение
<i>SSR</i>	Соотношение кремнезема и полуторной окиси (см. в разделе 3)
<i>T, t</i>	Время, извилистость (см. в разделе 7), поверхностное натяжение (см. в разделе 7)
<i>t</i>	Толщина двойного слоя
<i>T</i>	Абсолютная температура, среднегодовая температура, Тесла, индекс оттаивания, гидропроводность
<i>TS</i>	Прочность на растяжение
<i>TSC</i>	Тепловая емкость (см. в разделе 8)
<i>T_a</i>	Коэффициент оттаивания воздухом, время, необходимое для установления равновесия (см. в разделе 16)
<i>T_f</i>	Время, необходимое для первого разрушения (см. в разделе 16)
<i>T_m</i>	Средний индекс оттаивания
<i>T_s</i>	Поверхностное натяжение
<i>T_s</i>	Напряжение на границе твердого тела и жидкости (см. в разделе 4)
<i>T</i>	Напряжение на границе жидкости и пара (см. в разделе 4)
<i>T_s</i>	Напряжение на границе твердого тела и пара (см. в разделе 4)
<i>u</i>	Давление поровой воды
<i>U</i>	Общая теплоемкость (см. в разделе 8), степень консолидации (см. в разделе 16)
<i>UP</i>	Неограниченный тест на проникновение (см. в разделе 6)
<i>V, v</i>	Скорость, объем, пустоты
<i>V</i>	Среднемесячная скорость ветра (см. в разделе 14)
<i>V'</i>	Вегетативный фактор (см. в разделе 14)
<i>VM</i>	Коэффициент контроля эрозии (см. в разделе 14)
<i>V_{su}</i>	Коэффициент вариации (см. в разделе 16)
<i>V_s</i>	Объем твердого тела
<i>v_v</i>	Объем вакуума
<i>W, w</i>	Вес
<i>W</i>	Ширина раскрытия трещины (см. в разделе 11), ширина дорожного покрытия (см. в разделе 7), ширина совокупного основания, подвергаемого инфильтрации (см. в разделе 7)
<i>WL</i>	WL Рабочий уровень (см. в разделе 10)
<i>W_c</i>	Длина поперечных трещин (см. в разделе 7)
<i>W_x</i>	Вес пестика (см. в разделе 11)
<i>X, x</i>	Расстояние, химический символ элемента (см. в разделе 10)
<i>XRD</i>	Дифракция рентгеновских лучей
<i>Y, y</i>	Y, y
<i>Z, z</i>	Расстояние, высота напора
<i>Z</i>	Атомный номер (см. в разделе 10)
<i>Альфа (α)</i>	Угол, коэффициент, угол смачивания (см. в разделе 7), температуропроводность (см. в разделе 8)
<i>Бета (β)</i>	Угол, бета-распад

<i>Гамма (γ)</i>	
γ	Единица веса почвы
γ_o	Сухая единица веса почвы
γ_m	Массовая единица массы почвы
γ_T	Общий удельный вес почвы
γ_w	Вес единицы воды, погруженная единица веса почвы, гамма-распад, деформация при сдвиге (см. в разделе 11)
γ_r	Контрольная деформация (см. в разделе 11)
<i>Дельта (δ)</i>	Динамическая деформация сдвига (см. в разделе 11)
<i>Ипсилон (ϵ)</i>	Угол, диэлектрическая постоянная
ϵ_w	Диэлектрическая проницаемость для воды (см. в разделе 4)
ϵ_m	Диэлектрическая проницаемость для монтмориллонита (см. в разделе 4)
<i>E</i>	Энергия, электродвижущая сила
<i>Зета (ζ)</i>	Дзета-потенциал
<i>Эта (η)</i>	Коэффициент вязкости жидкости (см. в разделе 7)
<i>Тета (θ)</i>	Угол, константа
<i>Каппа (κ)</i>	Расстояние от поверхности частицы (см. в разделе 4)
<i>l/k</i>	Толщина двойного слоя (см. в разделе 4)
<i>Лямбда (λ)</i>	Удельная проводимость (см. в разделе 9), характеристическая длина (см. в разделе 7)
λ_c	Поправочный коэффициент на растрескивание поверхности (см. в разделе 16)
<i>Мю (μ)</i>	(μ) Угол трения
μ_r	Коэффициент остаточной прочности (см. в разделе 11)
<i>Ню (ν)</i>	Ионная валентность (см. в разделе 4)
<i>Кси (ξ)</i>	Соотношение натяжения или сцепления грунта (см. в разделе 11)
<i>Ро (ρ)</i>	Плотность (см. в разделе 8)
<i>R</i>	Электрическое сопротивление
ρ	Удельное сопротивление (см. в разделе 9)
<i>Сигма (σ)</i>	Нормальное напряжение на плоскости сдвига (см. в разделе 11)
σ_v	Вертикальное напряжение
$\Delta\sigma$	Девиаторное напряжение
σ_t	Растягивающее натяжение
σ'_v	Вертикальное эффективное напряжение, плотность поверхностного заряда
<i>Тау (τ)</i>	Напряжение сдвига
τ	Напряжение сдвига на естественной поверхности скольжения (см. в разделе 11)
τ_r	Остаточное напряжение (см. в разделе 11)
τ_f	Пиковая прочность (см. в разделе 11)
<i>Фи (ϕ)</i>	Угол, угол трения почвы
ϕ_r	Остаточный угол трения

ϕ'	Эффективный угол трения
<i>Пси</i> (ψ)	Коэффициент эффективной глубины (см. в разделе 11), скорость потока в энергетических полях (см. в разделе 7), поверхностный потенциал (см. в разделе 4), кормовой потенциал (см. в разделе 4)
<i>Омега</i> (ω)	
ω	Содержание влаги
ω_p	Предел пластичности
ω_L	Верхний предел пластичности
ω_s	Предел усадки

