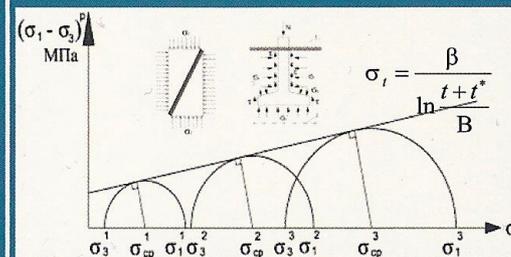




РОМАН Л. Т., ЦАРАПОВ М. Н.,
КОТОВ П. И., ВОЛОХОВ С. С.,
МОТЕНКО Р. Г., ЧЕРКАСОВ А. М.,
ШТЕЙН А. И., КОСТОУСОВ А. И.



ПОСОБИЕ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПРОМЕРЗАЮЩИХ, МЕРЗЛЫХ
И ОТТАИВАЮЩИХ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ



**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА**

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
кафедра геокриологии

Пособие по определению
физико-механических свойств
промерзающих, мерзлых
и оттаивающих дисперсных грунтов



УДК 551.341
ББК 26.36
М54

*Печатается по решению заседания кафедры геокриологии
Геологического факультета МГУ (протокол № 1 от 26 апреля 2017 года
Научно-методического совета Геологического факультета)
при финансовой поддержке
Центра Геокриологии МГУ*

*Авторы составители:
Роман Л.Т., Царапов М.Н., Котов П.И., Волохов С.С.,
Мотенко Р.Г., Черкасов А.М., Штейн А.И., Костоусов А.И.*

Рецензенты:

М54 Пособие по определению физико-механических свойств промерзающих, мерзлых и оттаивающих дисперсных грунтов / Роман Л.Т., Царапов М.Н. и др. — М. : «КДУ», «Университетская книга», 2018. — 188 с.

ISBN 978-5-91304-770-0

В книге собраны основные труды выдающегося натуралиста и биогеографа В пособии рассмотрены основные полевые и лабораторные методы определения физических, теплофизических и механических свойств промерзающих, мерзлых и оттаивающих грунтов. Впервые проанализированы актуализированные и гармонизированные ГОСТы, нормативные документы по проектированию и строительству, авторские свидетельства и публикации отечественных и зарубежных авторов, посвященные методическим вопросам испытаний. Рассмотрено влияние основных характеристик состава, физических свойств, а также температурного режима на формирование деформаций и прочности промерзающих, мерзлых и оттаивающих грунтов.

Настоящее пособие предназначено для студентов и аспирантов по направлению «Геология», специализирующихся по гидрогеологии, геокриологии, инженерной геологии, а также по курсу механики мерзлых грунтов в геологических, геологоразведочных, горных, транспортных, инженерно-строительных и гидротехнических вузах. Она также рассчитана на широкий круг исследователей, сотрудников проектных, изыскательских и производственных организаций, работающих в области хозяйственного освоения криолитозоны

УДК 551.341
ББК 26.36

© М.В. Глазов (наследники), 2017
© Издательство «КДУ», 2017

ISBN 978-5-91304-770-0

СОДЕРЖАНИЕ

I. Введение в механику мерзлых грунтов <i>Л.Т. Роман</i>	5
II. Лабораторные методы испытаний мерзлых грунтов.....	36
II.1. Определение состава и физических свойств мерзлых грунтов <i>П.И. Котов</i>	37
II.2. Определение температуры замерзания и оттаивания, фазового состава влаги в промерзающих грунтах <i>Р.Г. Мотенко</i>	59
II.3. Компрессионные испытания мерзлых грунтов <i>П.И. Котов</i>	70
II.4. Компрессионные испытания оттаивающих грунтов <i>П.И. Котов</i>	78
II.5. Вдавливание шарикового штампа <i>П.И. Котов</i>	88
II.6. Испытания мерзлых грунтов в условия одноосного сжатия <i>М.Н. Царапов</i>	97
II.7. Трехосные испытания <i>А.М. Черкасов, А.И. Штейн, А.И. Костоусов</i>	110
II.8. Растяжение <i>С.С. Волохов</i>	128
II.9. Сопrotивление сдвигу (срезу) по поверхности смерзания <i>С.С. Волохов</i>	131
II.10. Температурные деформации мерзлых пород <i>С.С. Волохов</i>	135
II.11. Сдвиг грунта по поверхности модели сваи <i>С.С. Волохов</i>	140
II.12. Определение деформаций и напряжений пучения при промерзании в закрытой и открытой системе <i>М.Н. Царапов</i>	142

III. Испытания мерзлых грунтов в полевых условиях.....	154
III.1. Испытание замороженных свай <i>Л.Т. Роман, М.Н. Царапов</i>	155
III.2. Испытание горячим штампом <i>П.И. Котов, М.Н. Царапов</i>	163
III.3. Определение деформаций оттаивающего массива <i>Л.Т. Роман, М.Н. Царапов, П.И. Котов</i>	170
III.4. Определение деформаций и сил пучения <i>Л.Т. Роман, М.Н. Царапов, П.И. Котов</i>	174
III.5. Определение сопротивления мерзлого грунта срезу <i>М.Н. Царапов</i>	179
III.6. Определение эквивалентного сцепления вдавливанием шарового штампа <i>Л.Т. Роман</i>	182
III.7. Определение сопротивления резанию <i>Л.Т. Роман</i>	186

I. ВВЕДЕНИЕ В МЕХАНИКУ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ (Л.Т. Роман)

Механические свойства промерзающих, мерзлых и оттаивающих грунтов изучаются прежде всего для решения практических задач: назначения нормативных и расчетных характеристик деформируемости и прочности, получения зависимостей, описывающих поведение грунтов под тепловыми и механическими нагрузками, как в основаниях сооружений, так и при криогенных процессах. Получение указанных зависимостей основано на результатах опытных и теоретических исследований, которые комплексно включают, кроме механических свойств, определение состава, физических характеристик, влияние температурного режима.

Особенности промерзающих, мерзлых грунтов обусловлены их многокомпонентностью. Они включают твердые частицы различного гранулометрического и минерального состава, лед, незамерзшую воду, газы. Кроме того, требуют дополнительных оценок механического поведения отдельных видов мерзлых грунтов: торфяных, засоленных, сильно-льדיстых, обладающих повышенной ползучестью и снижением длительной прочности. В процессе промерзания, понижения температуры, оттаивания меняется криотекстура, что также влияет на деформацию и прочность.

В комплекс исследований механических характеристик мерзлых грунтов необходимо включать определение всех физических параметров, как для грунтов в талом состоянии (гранулометрический и минеральный состав, показатели влажностных свойств, плотности: грунта, частиц и скелета грунта). Дополнительно необходимо определять температуру начала замерзания, фазовый состав грунтовой влаги в температурном диапазоне, засоленность, заторфованность.

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ВЛАГИ

Процесс замерзания зависит не только от рассмотренных выше энергетических связей воды с другими компонентами грунта, но и от внешних условий: давления, величины отрицательной температуры, скорости ее понижения.

Первые исследования изменения температуры грунта при промерзании были выполнены П.И. Андриановым [1], затем Н.А. Цытовичем, А.П. Боженовой [2]. В настоящее время накоплен большой фактический материал по исследованию изменения температуры грунтов при промерзании, как в лабораторных, так и полевых условиях [3].

Температура начала замерзания θ_{bf} или конца оттаивания θ_{th} грунтовой влаги определяет наиболее высокую «пороговую» температуру, при которой грунт переходит из талого состояния в мерзлое, и, наоборот.

На рис. 1 представлена общая схема изменения температуры грунта в процессе охлаждения, замерзания, оттаивания.

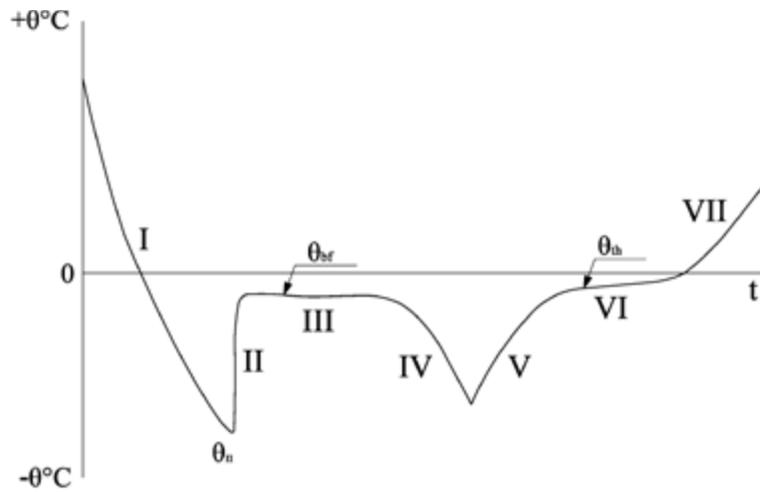


Рис. 1. Схема изменения температуры грунта в процессе охлаждения, заморозания и оттаивания

При помещении грунта в среду с отрицательной температурой, вначале наблюдается охлаждение (участок I) — понижение температуры грунта без льдовыделения. Обычно участок кривой охлаждения имеет вогнутость к оси температуры. Температура переохлаждения θ_n зависит от теплового баланса в заморающем грунте. Когда ее величина достигает минимального значения, в поровой воде образуются первые центры кристаллизации. Затем наблюдается резкое повышение температуры за счет выделения скрытой теплоты льдообразования (участок II). После температурного скачка наступает период с условно устойчивой постоянной температурой (когда $dq/dt \rightarrow 0$), в течение которого происходит кристаллизация наиболее свободной воды в грунте (участок III). Эта наиболее высокая температура называется температурой начала заморозания грунтовой влаги θ_{bf} . Она мало зависит от температуры окружающей среды, может быть принята константой для данного грунта, и относится к наиболее важным показателям его физических свойств, т.к. осредненно отражает внутренние связи между грунтовой влагой и всеми остальными компонентами, являясь исходной «начальной» температурой мерзлого состояния. При дальнейшем замораживании грунта его температура понижается по нелинейному закону с выпуклостью кривой к временной оси (участок IV). На этом участке происходит заморозание рыхлосвязанной влаги с постепенно уменьшающимся выделением скрытой теплоты льдообразования. И только по окончании этого процесса, когда в грунте остается лишь прочносвязанная вода, наблюдается более быстрое понижение температуры до температуры окружающей среды.

При повышении наружной температуры ход ее изменения в грунте (участок V) практически зеркально отражает участок IV. Нелинейность хода температурной кривой при повышении температуры свидетельствует о поглощении скрытой теплоты еще до начала таяния грунта. Температура же таяния (участок U) несколько выше температуры заморозания, также может быть принята стабильной характеристикой данного грунта.

Температура начала заморозания обусловлена физико — химическим взаимодействием молекул воды с частицами грунта. Для основных видов дисперсных незасоленных грунтов ниже приведены средние значения θ_{bf} в таблице 1.

Таблица 1.

Средние значения температуры начала заморозания различных грунтов

Грунт	Среднее значение температуры начала заморозания, °C
Песок среднезернистый	0
Супесь	-0,1
Суглинок	-0,2
Глина (бентонитовая)	-0,7
Глина (полиминеральная)	-0,25
Торф среднеразложившийся	-0,15

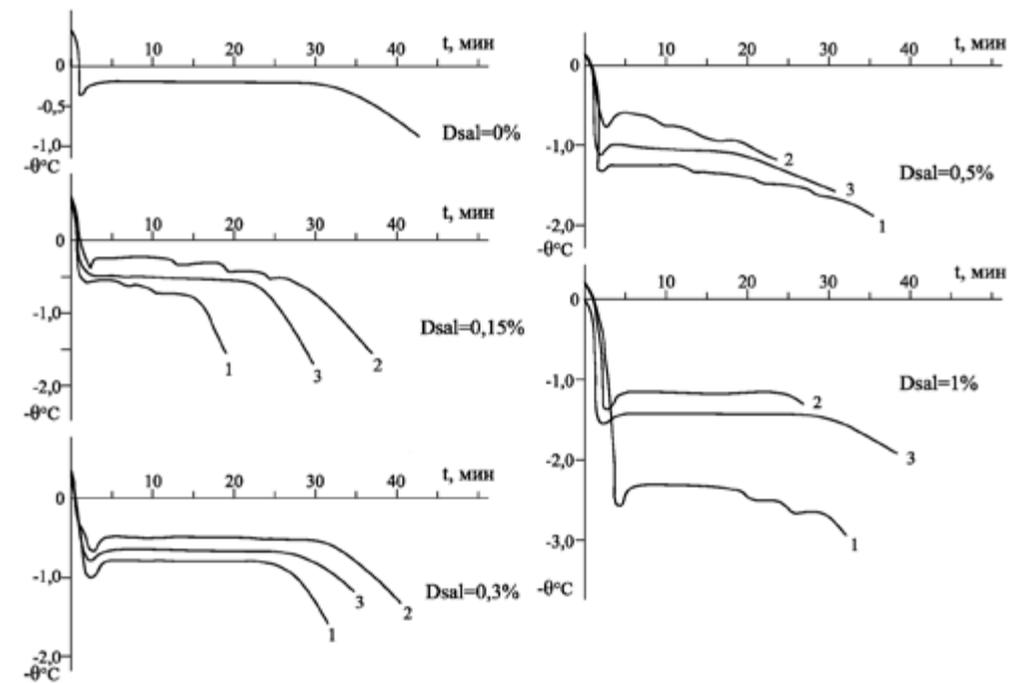


Рис. 2. Изменение температуры супеси в процессе заморозания при различной засоленности (D_{sol} , %): 1 — NaCl; 2 — MgSO₄; 3 — комплекс солей: NaCl : MgSO₄ : NaHCO₃ : CaSO₄, взятых в пропорции: 0.54 : 0.31 : 0.075 : 0.075

Содержание солей, растворенных в грунтовой влаге, связывает ее молекулы, понижая температуру заморозания. Степень понижения θ_{bf} обусловлена влиянием химического состава солей и концентрацией порового раствора

K_{ps} каждой соли. Однако до настоящего времени показателем содержания солей в грунтах принимается выраженная в процентах засоленность, равная отношению суммарной массы солей, независимо от их химического состава, к массе сухого грунта. При таком подходе не учитывается влияние на величину θ_{bf} химического состава солей. Это наглядно иллюстрируется примером, представленным на рис. 2, на котором приведены графики изменения температуры в процессе заморозания супеси незасоленной и имеющей засоленность: 0,15; 0,3; 0,5 и 1,0% солями NaCl и MgSO₄, а также комплексом солей – NaCl, MgSO₄, NaHCO₃, CaSO₄, взятых в отношении 0,54:0,31:0,075:0,075. Исходные значения физических свойств испытанной супеси следующие: плотность грунта $\rho = 1,73-176 \text{ г/см}^3$; плотность частиц грунта $\rho_s = 2,6 \text{ г/см}^3$; влажность $W_{tot} = 30-33\%$. [4]. Как можно видеть, при одинаковой засоленности NaCl наиболее значительно понижает температуру начала заморозания порового раствора.

Процесс промерзания и дальнейшего понижения температуры сопровождается уменьшением содержания незамерзшей воды, увеличением объема льда. Степень фазовых превращений зависит от многих факторов, основными из которых являются гранулометрический и минеральный состав грунтов, содержание солей в поровом растворе, температурный режим. В качестве примера на рис. 3 и 4 приведены зависимости незамерзшей воды от температуры для различных видов грунтов.

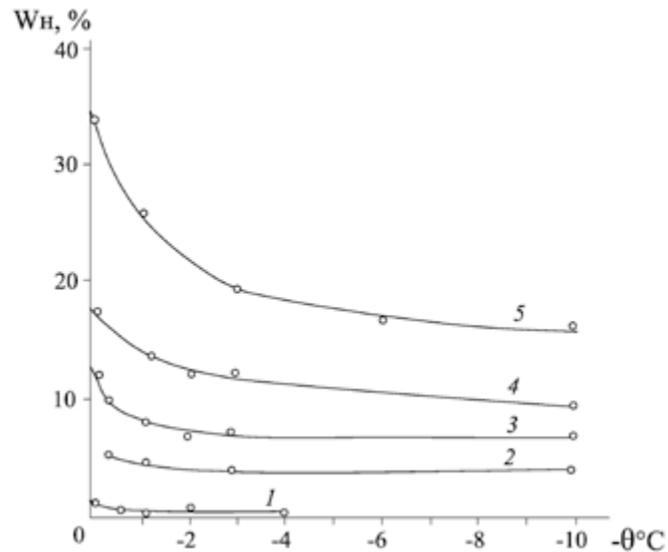


Рис. 3. Кривые содержания незамерзшей воды в различных видах мерзлых грунтов в зависимости от отрицательной температуры: 1 – кварцевый песок; 2 – супесь; 3 – суглинок; 4 – глина; 5 – глина, содержащая монтмориллонит

Обработка большого числа экспериментальных данных по содержанию незамерзшей воды в торфяных, минеральных, засоленных и незасоленных грунтах показывает, что зависимость $W_w/W_{tot} - \theta/\theta_{bf}$ является обобщенной.

Выбор гомологической температуры в качестве обобщенной переменной, позволяет совместить начало и конец шкалы изменения температуры замер-

зания всех грунтовых разновидностей [8; 4] (при $\theta/\theta_{bf} = 1$, $W_w/W_{tot} = 1$; при $\theta/\theta_{bf} \rightarrow \mu$, $W_w/W_{tot} \rightarrow 0$). На рис. 5, в системе координат $W_w/W_{tot} - 0,1\theta/\theta_{bf}$, приведены результаты экспериментального определения влажности за счет незамерзшей воды в грунтах различного минерального, а также гранулометрического состава (в том числе в таких специфических грунтах как торф и засоленные грунты), полученные многими исследователями. Как можно видеть, опытные точки весьма близко группируются вокруг единой кривой. Это указывает на то, что соотношения W_w/W_{tot} и θ/θ_{bf} являются обобщающими параметрами физических свойств и факторов, которые определяют фазовый состав грунтовой влаги.

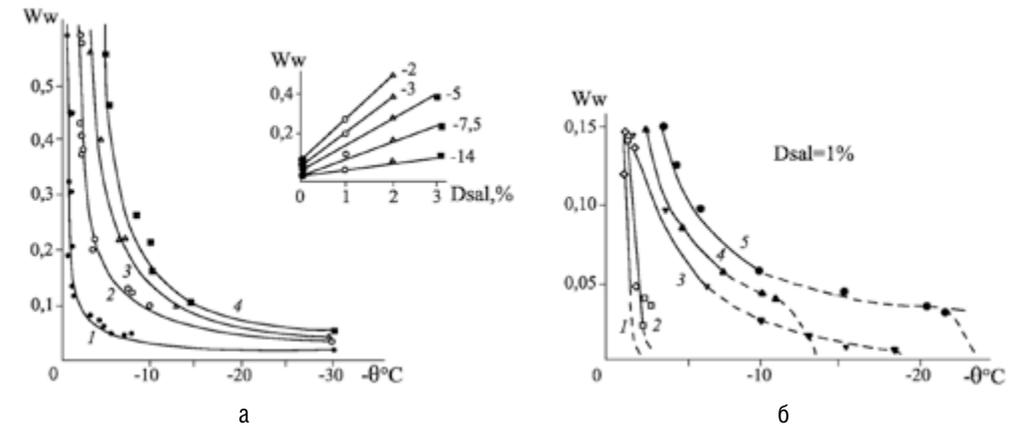


Рис. 4. Динамика фазовых переходов влаги в засоленных грунтах (Ершов и др., 1999): а) – зависимость содержания незамерзшей воды W_w в каолиновой глине от температуры θ при засоленности NaCl (D_{sol} : 1–0%, 2–1%, 3–2%, 4–3%); б) – зависимость содержания незамерзшей воды W_w в песке от температуры θ и состава солей $D_{sol} = 1\%$ (1 – Na₂SO₄; 2 – Na₂CO₃; 3 – NaNO₃; 4 – KCl; 5 – NaCl); сплошные линии – экспериментальные данные, пунктирные – расчетные

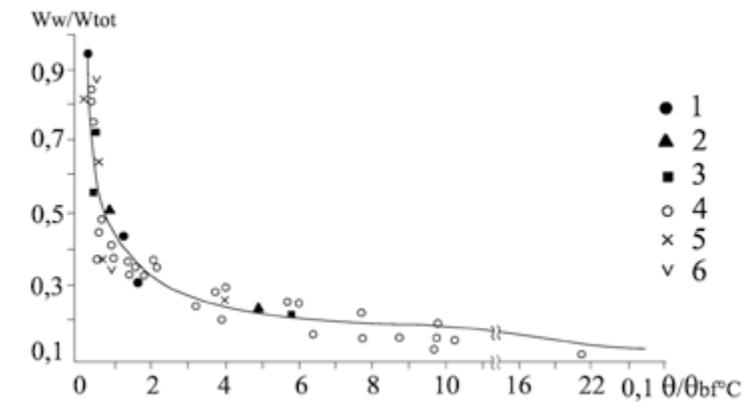


Рис. 5. Зависимость W_w/W_{tot} от θ/θ_{bf} для грунтов: 1 – торфяных [6]; 2 – юрской глины; 3 – покровного суглинка [7]; 4 – суглинка [1]; 5 – тяжелого суглинка и 6 – каолиновой глины, засоленной CaCl₂ [3]

ФОРМИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ ПРИ ПРОМЕРЗАНИИ

Промерзание грунтов сопровождается криогенными процессами, формирующими напряженно-деформированное состояние и включающими:

- фазовое превращение воды в лед, сопровождаемое увеличением ее объема примерно на 9%;
- криогенную миграцию воды к фронту промерзания в мелкодисперсных грунтах и обезвоживание грунтов в пределах нижележащих горизонтов;
- напорную миграцию воды и грунтовой массы, вызванную отжатием из локально промерзающих участков в менее напряженные талые зоны;
- температурные деформации всех грунтовых компонентов.

Все перечисленные процессы протекают одновременно и неоднозначно влияют на формирование напряженно-деформированного состояния грунта. Увеличение объема замерзающей воды и ее миграция к фронту промерзания являются причиной выпучивания. Температурное сокращение всех грунтовых компонентов с понижением температуры и обезвоживание грунта, расположенного под промерзающим слоем, приводит к осадкам. Количественный учет их влияния остается трудноразрешимой проблемой механики мерзлых грунтов, несмотря на огромный объем исследований в данном направлении. Обобщенные результаты исследований показывают, что для решения проблем устойчивости оснований сооружений первостепенное значение имеет оценка деформаций, сил пучения и возможности температурного растрескивания. Фактором, обуславливающим формирование напряженно-деформированного состояния, является миграция влаги. Если промерзание происходит в условиях закрытой системы (без возможности подтока воды), происходит перераспределение начального увлажнения. Однако закрытые системы встречаются в редких случаях. В природных условиях в результате миграции влаги к фронту промерзания и ее замерзания увеличение объема грунта может достигать десятков и даже сотен процентов.

Таблица 2.

Допустимое расстояние от глубины промерзания до УГВ

Наименование грунта	Допустимое расстояние от глубины промерзания до УГВ, м
Глина монтмориллонитовая	3.5
Глина каолинистая	2.5
Супесь	1.5
Песок мелкий пылеватый	1.0

Ввиду чрезвычайной сложности процесса миграции и влияния на него множества внешних факторов (градиентов давления, температуры, влагосодержания), а также состава и физических свойств грунтов (дисперсности, плотности, пори-

стости и др.) прогноз объема мигрирующей влаги весьма труден, хотя получено много решений, базирующихся на дифференциальном уравнении А.В. Лыкова [9] и опытным определении миграционного потока [10; 11; 12; 13 и др.]. Для предварительной оценки возможной миграции рассматривают расстояние от максимальной границы промерзания до уровня грунтовых вод (УГВ) (табл. 2).

ПУЧЕНИЕ

Деформация пучения [14] оценивается интенсивностью пучения f , которая представляет дифференцированную по глубине пучающегося слоя z алгебраическую сумму деформаций грунта s за счет его расширения и сокращения: $f = ds/dz$.

Следующей характеристикой является модуль пучения m , под которым понимается величина пучения, отнесенная к слою промерзающего пучающегося грунта мощностью 1 м. Величина m вычисляется в зависимости от средней интенсивности пучения \bar{f}

$$m = 100\bar{f}(100 - \bar{f}) \quad (1)$$

В зависимости от модуля пучения грунты подразделяются по степени пучинистости на следующие виды:

Потенциально пучинистые	$m = 0$
Слабо-	$0 < m \leq 3,5$
Средне-	$3,5 < m \leq 7$
Сильно-	$7 < m \leq 12$
Чрезмерно пучинистые	$m > 12$

Устойчивость сооружений обусловлена как деформациями, так и силами пучения, воздействующими на фундаменты и заглубленные конструкции. Выделяют касательные и нормальные силы пучения. Расчетная схема воздействия сил пучения на фундамент, заглубленный в слое сезонного промерзания, представлена на рис. 6.

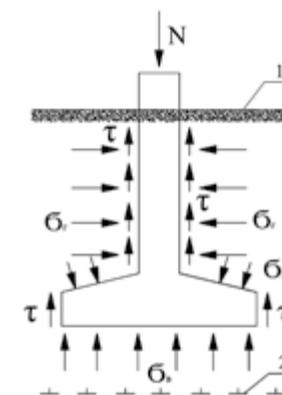


Рис. 6. Расчетная схема воздействия сил пучения на фундамент, заглубляемый в пределах деятельного слоя: касательных τ , нормальных: вертикальных Σ_v , горизонтальных σ_h ; 1 – поверхность грунта; 2 – граница промерзания; N – нагрузка на фундамент

Величину касательных сил пучения принято принимать равной предельному значению сил смерзания с боковой поверхностью фундамента [15]. Обобщение экспериментальных данных позволяет установить средние касательные силы пучения (табл. 3). σ

Таблица 3.

Касательные силы пучения по бетонным поверхностям

Грунты	τ , МПа при d, м		
	1.0	2.0	3.0
Пылевато-глинистые при $I_L > 0.5$, пески мелкие и пылеватые при $Sr > 0.95$	0.13	0.11	0.09
Пылевато-глинистые при $0.25 < I_L < 0.5$ пески мелкие и пылеватые при $0.8 < Sr < 0.95$	0.1	0.09	0.07
Пылевато-глинистые при $I_L > 0.25$ пески мелкие и пылеватые при $0.6 < Sr < 0.8$	0.08	0.07	0.05

Примечание: I_L – показатель текучести; Sr – степень влажности. Для металлических поверхностей τ рекомендуется применять с коэффициентом 0.7

Что же касается нормальных сил пучения, то они могут намного превышать уравнивающие напряжения, создаваемые нагрузкой от сооружения (табл. 4, [14]). В связи с этим для предотвращения воздействия нормальных сил пучения необходимо заглублять фундаменты ниже глубины промерзания либо предусматривать противопучинные мероприятия.

Таблица 4.

Величина нормальных сил пучения по полевым опытам

Условия промерзания	Глубина заложения подошвы месдозы, м	Мощность мерзлого слоя под месдозой, см	Температура мерзлого слоя (min), °C	Скорость пучения грунта под месдозой, мм/сут	Нормальные силы пучения под подошвой месдозы, 10^5 Па
Слой промерзания сливается с вечномерзлой толщей	0,62	16	-0,4	–	1,7
		20	-0,3	1,38	2,8
		24	-0,7	1,38	6,0
		30	-1,4	1,07	20,5
		35	-3,0	0,92	35,2
		61	-4,8	0,63	56,0

МОРОЗОБОЙНОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ

При понижении температуры все компоненты мерзлых грунтов претерпевают сокращение в объеме, создающее температурные деформации и внутреннее напряжение. Как температурные деформации, так и напряжения обусловлены

целым комплексом состава и физических свойств грунтов, влиянием температурного режима, временно́го фактора с учетом последствия и релаксации. Обобщение многочисленных исследований температурных деформаций и напряжений в полевых и лабораторных условиях, теоретических разработок представлены в работах [16; 17; 18; 19; 20]. Следует отметить необходимость учета возможности морозобойного растрескивания в основаниях сооружений и разработки требований нормативных документов.

ПРОГНОЗ ДЛИТЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И ПРОЧНОСТИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Мерзлые грунты обладают ярко выраженными реологическими свойствами, которые проявляются в виде ползучести (деформирования во времени даже при постоянном напряжении), снижении прочности во времени, релаксации напряжений. Проявление реологических свойств мерзлых грунтов обусловлено комплексом взаимодействия всех компонентов, но наиболее весомым вкладом является наличие льда как идеального реологического тела. Центральной проблемой механики мерзлых грунтов является необходимость разработки методов прогноза длительной деформации и прочности мерзлых грунтов по результатам экспериментальных определений на период, сопоставимый со сроками эксплуатации сооружений. Теоретические и практические основы реологии мерзлых грунтов разработаны под руководством С.С. Вялова и его школой [21; 22; 23; 24].

Проявление ползучести и снижение прочности взаимосвязаны: с постепенным деформированием накапливается разрушение цементационных и межчастичных связей мерзлых грунтов. Деформации могут быть упруго-вязкими (восстанавливающимися при снятии нагрузки) и упруго-пластично-вязкими, в которых пластично-вязкая доля не восстанавливается. Общая деформация равна сумме условно-мгновенной деформации γ^0 и деформации, развивающейся во времени γ_t^{ev} и включающей упруго-вязкую γ^{ev} либо упруго- и пластично-вязкую $\gamma^{ev} + \gamma^{pv}$.

Процесс деформирования может протекать с уменьшающейся, постоянной либо возрастающей скоростью. В первом случае он называется затухающей ползучестью, во втором и третьем – незатухающей.

Характерные кривые развития деформаций мерзлых грунтов во времени и их скоростей приведены на рис. 7а. Они называются кривыми ползучести.

При затухающей ползучести (кривая 1) деформация развивается с уменьшающейся скоростью, стремящейся к нулю – $d\gamma/dt \rightarrow 0$, а величина γ_t стремится к конечному значению $\gamma_\infty = \text{const}$.

Незатухающая ползучесть (кривая 2), кроме условно-мгновенной деформации γ_0 , включает γ_0 три стадии: I – стадию затухающей, неустановившейся ползучести (участок $o-n$); II – стадию установившегося течения (участок $n-m$) и стадию III – прогрессирующего течения (участок: $m-f$), заканчивающуюся разрушением. В случае больших нагрузок вторая стадия может сразу переходить в третью (кривая 3).

Если нагрузка незначительна, то восстановление связей преобладает над их разрушением. В этом случае доминирует процесс упрочнения, что и обуславливает затухающий характер деформирования.

Если же нагрузка достаточно велика, то влияние упрочнения превосходит процесс разрушения лишь на стадии неустановившейся ползучести. По мере же дальнейшего развития деформирования все возрастающее нарушение структурных связей, распад агрегатов, переориентация частиц, рост дефектов структуры вызывают более интенсивное деформирование. Расслабление компенсируется упрочнением. Ползучесть протекает с примерно постоянной скоростью (участок $n-m$).

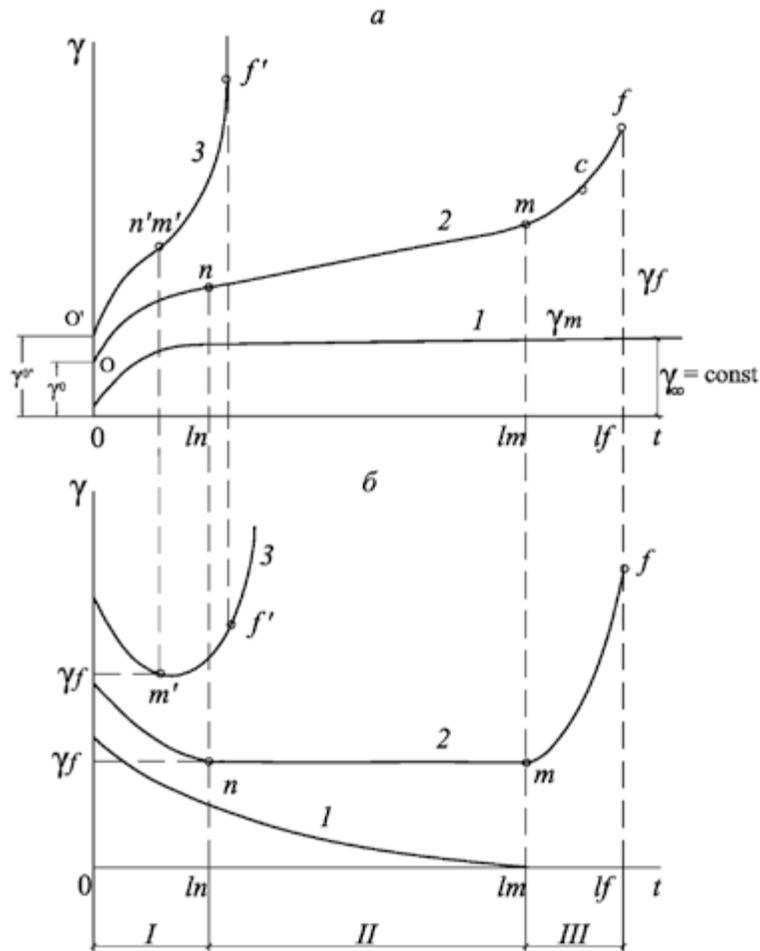


Рис. 7. Развитие кривых ползучести (а) и их скоростей (б): I – затухающая ползучесть; II – III – незатухающая ползучесть

Дальнейшее накопление нарушений структуры приводит к превалированию расслабления над упрочнением, скорость деформирования возрастает и ползучесть переходит в стадию прогрессирующего течения (участок $m-f$).

В пределах стадии прогрессирующего течения выделяются два этапа: первый (участок $m-c$), на котором развивается пластическая деформация, не вызывающая разрушения; и второй (участок $c-f$), на котором интенсивно развиваются микротрещины, быстро развивается деформация, приводящая к разрушению.

Первый из указанных участков может развиваться весьма длительное время, не исчерпывая несущей способности грунта. При прочих равных условиях (вид грунта, физические свойства, температура) продолжительность стадий ползучести зависит от величины нагрузки. Если испытать серию образцов под постоянной, но различной для каждого образца нагрузке, получим семейство кривых ползучести. Чем больше нагрузка, тем меньше продолжительность стадии II, и тем скорее наступит стадия разрушения III.

Зависимости между скоростью установившейся ползучести $\dot{\gamma}$ и напряжением τ называются реологическими. Отношение приращения величины действующего напряжения на каждом участке $\Delta\tau$ к приращению скорости деформации $\Delta\dot{\gamma}$ соответствует коэффициенту вязкости. Реологические кривые мерзлых грунтов имеют вид, характерный для реологических кривых структурированных твердообразных тел. Течение возникает только после того, когда напряжения превысят некоторый предел, названный пределом упругости (рис. 8). До этого предела деформации являются либо чисто упругими, или протекают с малой скоростью, которой можно пренебречь. При дальнейшем незначительном увеличении напряжения до τ_r отмечается линейный участок с постоянной вязкостью (называемой шведовой) $\eta_0 = (\tau - \tau_k) / \dot{\gamma}$. При $\tau > \tau_r$ начинается разрушение структуры, вязкость становится переменной. Процесс разрушения завершается либо течением предельно разрушенной структуры с наименьшей вязкостью, или разрывом сплошности. Для течения разрушенной структуры (напряжение меняется в пределах $\tau_T - \tau_f$) характерен линейный участок с постоянной минимальной вязкостью (называемой бингамовой) $\eta_f = (\tau - \tau_f) / \dot{\gamma}$. Напряжение τ_T названо условным пределом текучести. До этого предела деформации ползучести развиваются с малой скоростью. Когда напряжение больше τ_T , то скорость течения резко возрастает. Третье критическое напряжение τ_f соответствует полному разрушению структуры.

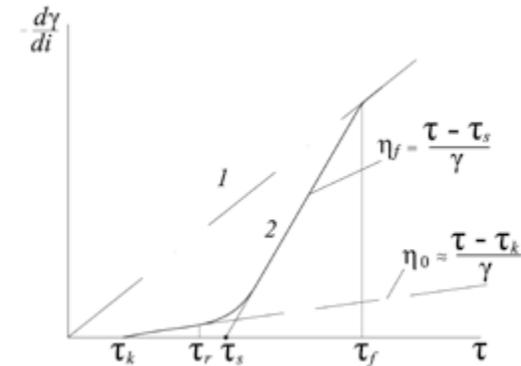


Рис. 8. Схемы реологических кривых: 1 – идеальные жидкости, 2 – твердые тела

Значения параметров реологических кривых (τ_k , τ_r , τ_f , η) мерзлых пород зависят от их физических свойств, температуры, способов и режима испытания. При прочих равных условиях коэффициент вязкости возрастает с уменьшением дисперсности и увеличением жесткости минерального каркаса. Основные прогнозные уравнения длительной деформации, параметры которых определяются экспериментально, приведены в табл. 5.

Таблица 5.

Прогнозные уравнения

Исходные предпосылки		Уравнения
Теории	Старения	$\gamma = \left(\frac{\tau}{A(t, \theta)} \right)^{\frac{1}{m}}$
	Течения	$\gamma = \left(\frac{\tau}{A_0} \right)^{1/m} \left(\frac{T_2}{T_1 + t} \right)^n + \frac{1}{G} \cdot \frac{d\tau}{dt}$
	Упрочнения	$\gamma = [a(\alpha + 1)]^{\frac{1}{\alpha+1}} \exp \left[\frac{\tau}{b(\alpha + 1)} \right]^{1/\alpha+1}$
	Наследственной ползучести	$\gamma = \frac{1}{G_0} \left[\tau(t) + \int_0^t K(t - \nu) \tau(\nu) d(\nu) \right]$
Феноменологические формулы	Степенная	$\gamma = \left(\frac{\tau}{A_p} \right)^{1/m} \left(\frac{t}{T} \right)^\beta$
	Логарифмическая	$\gamma = \left(\frac{\tau}{A_0} \left(1 + \delta \ln \frac{t+T}{T} \right) \right)^{\frac{1}{m}}$
	Дробно-линейная	$\gamma = \gamma_0 + (\gamma_\infty - \gamma_0) \frac{t}{T^* + t}$

Примечание: γ – деформация сдвига, G_0 – мгновенный модуль упругости, G – модуль сдвига, t, ν – периоды времени от начала нагружения, $K(t, \nu)$ – ядро ползучести, $A(t, \theta)$, m , T_1, T_2 , n , a , α , δ , A_p , T – опытные параметры

Уменьшение величины разрушающего напряжения с увеличением времени до разрушения и есть проявление процесса снижения прочности во времени. Это снижение характеризуется кривой длительной прочности. Прочность на определенный момент времени t определяется на основе перестройки семейства кривых незатухающей ползучести, которые включают стадию III – прогрессирующего течения во времени (рис. 9а). Для получения кривой длительной прочности испытываются при постоянной температуре идентичные образцы под нагрузками $\tau_1, > \tau_2, > \tau_3 \dots$. Затем строится семейство кривых

ползучести и определяется время, $t_1, < t_2, < t_3 \dots$ за которое разрушился каждый из образцов. Периоды времени от приложения нагрузки до разрушения t_1, t_2, t_3 проектируются на ось абсцисс. На оси ординат откладываются соответствующие этим переходам значения разрушающих напряжений τ_1, τ_2, τ_3 . В результате такого построения получается зависимость между разрушающим напряжением и временем до разрушения – кривая длительной прочности (рис. 9б). В ее пределах выделяют:

- условно-мгновенную прочность τ_0 – наибольшую прочность, характеризующую сопротивление материала быстрому разрушению; величина τ_0 определяется начальной ($t \rightarrow 0$) ординатой кривой длительной прочности;
- длительную прочность $\tau(t)$, определяемую напряжением, которое вызывает разрушение материала за заданный промежуток времени; величина $\tau(t)$ определяется текущей координатой кривой длительной прочности;
- предел длительной прочности τ_∞ , соответствующий напряжению, до повышения которого деформация имеет затухающий характер, и разрушение не происходит при любом практически наблюдаемом времени воздействия нагрузки. Величина τ_∞ определяется асимптотой кривой длительной прочности.

Основные уравнения для расчета длительной прочности приведены в таблице 6.

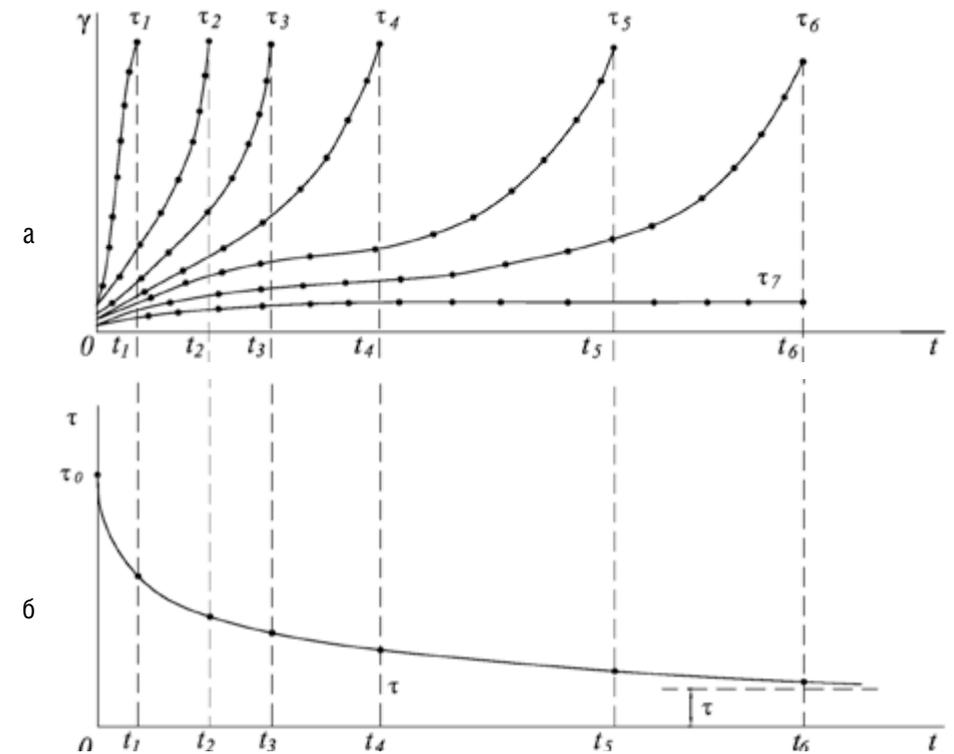


Рис. 9. Семейство кривых ползучести (а) и кривая длительной прочности (б)

Уравнения длительной прочности

Таблица 6.

Уравнение	Авторы	Примечание
$\sigma_t = \frac{\beta}{\ln \frac{t+t^*}{B}}$	С.С. Вялов	σ_H – значение прочности t_H – время в °С/МПа; где T_f – период релаксации; τ_0 – условно-мгновенная прочность, t^* – единичное время; $\beta, \beta_\theta,$ $\alpha, \delta, B, T, C_{\theta 0}, t_0$ – параметры уравнений, \mathcal{E} – деформация ползучести, $\dot{\epsilon}$ – скорость ползучести
$\sigma_t = \left(\frac{t+1}{T} \right)^{-\alpha}$	С.С. Вялов	
$t_p = \frac{T}{\delta} \cdot \frac{\sigma_0 - \sigma}{\sigma - \sigma_\infty}$	С.С. Вялов, Ю.К. Зарецкий	
$T = T_0 \frac{\sigma_\infty}{\sigma_i - \sigma_\infty},$	Ю.К. Зарецкий	
$\sigma_\infty = \sigma_f - \frac{\delta (\sigma_0 - \sigma_f) \cdot t_f}{T (t_f - t_0)}$	A.M. Fish	
$\sigma_f \approx \sigma_c \left(\frac{\dot{\epsilon}_f}{\dot{\epsilon}_c} \right)^{1/n}$	O. Andersland, I. AlNouri, F. Sayles, B. Ladanyi	
$\tau_i = \tau_0 - \frac{T_r}{t} (\tau_0 - \tau_i)$	С.Е. Гречищев	
$\delta = \frac{\delta}{(t/t_0)^{\beta_\theta}}$	Л.Т. Роман	
$\sigma_c = \frac{ \theta }{b} \left[\frac{t_0}{t} \right]^r$	A.A. Коновалов	
$\sigma_t = \frac{\sigma_H}{(t/t_H)^{\beta_\theta}}$	Wu Ziwang, Zhang Changqing,	

ПРОГНОЗ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ МЕТОДАМИ ВРЕМЕННЫХ АНАЛОГИЙ

Теоретические основы методов временных аналогий разработаны Дж. Ферри [25]. Применительно к прогнозу длительной деформации и прочности мерзлых грунтов получено обоснование и разработаны методики экспериментальных определений в работе [4]. Суть методов временных аналогий базируется на экспериментальном выявлении зависимости между деформацией, напряжением и временем на основе интенсификации процесса деформирования факторами, влияющими на этот процесс. Такими факторами для мерзлых грунтов являются: повышение температуры, увеличение напряжения, повышение засоленности, льдистости, заторфованности. Повышение температуры ускоряет реологические процессы – одна и та же деформация мерзлых грунтов с одинаковыми физическими свойствами при повышении температуры будет достигнута за менее короткий период времени. Такой же эффект наблюдается, если при постоянной температуре увеличивать напряжение при любом режиме нагружения, или определенным образом задавать физические свойства (испытывать в изометрических условиях идентичные образцы, отличающиеся лишь более высоким значением засоленности, льдистости либо заторфованности и т.д.). Другими словами, влияние на деформируемость перечисленных факторов и времени взаимозаменяемо, аналогично. Это значит, что деформация, достигнутая в течение опытного периода при высоком значении параметров фактора, ускоряющего ползучесть (например, при высокой отрицательной температуре, большом напряжении), равна деформации за гораздо более длительный период времени, но для условий меньшего значения этих параметров. Это позволяет по опытным данным прогнозировать деформации на период времени, сопоставимый со сроками эксплуатации сооружений. На рис. 10 приведен пример прогноза длительной ползучести мерзлого суглинка методом напряженно-временной аналогии. Указана аналогичность закономерности развития ползучести при задании температуры и засоленности, т.е. при использовании метода температурно- и засоленно-временной аналогии.

Основной задачей при использовании методов временных аналогий является установление соотношения между периодами времени, за которые достигается одна и та же величина деформации при различных заданных значениях параметров ускоряющих факторов. Соотношение этих периодов времени называется коэффициентом редукиции (a)

$$a = t_2/t_1. \quad (2)$$

Суть коэффициента редукиции раскрывается с позиций механических и физических представлений о процессе ползучести [4].

Экспериментально коэффициент редукиции a определяется на основе опытов на ползучесть. Разработан графический способ нахождения a . При этом, как правило, строится семейство зависимости податливости I от времени t в полулогарифмическом масштабе. Под податливостью понимается отношение относительной осадки ϵ к напряжению σ :

$$I = \epsilon/\sigma. \quad (3)$$

При допущении линейной зависимости между $\Delta\epsilon$ и $\Delta\sigma$ податливость представляет собой обратную величину модуля деформации E .

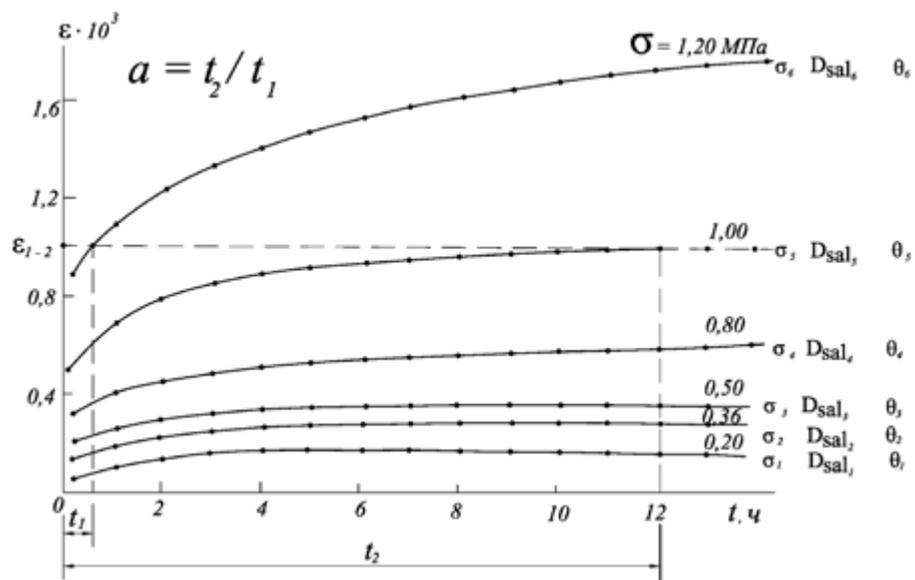


Рис.10. Кривые ползучести мерзлого суглинка (одноосное сжатие, $\theta = -4^\circ\text{C}$) при различном напряжении ($\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3 < \sigma_4 < \sigma_5 < \sigma_6$); такой же характер кривых ползучести проявляется, когда испытания выполняются при различных значениях засолённости ($D_{sal1} < D_{sal2} < D_{sal13} < D_{sal4} < D_{sal5} < D_{sal6}$) и температуры ($\theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \theta_4 < \theta_5 < \theta_6$)

Если кривые податливости подобны, между ними отмечается только горизонтальная сдвигка. Обобщенная кривая 1 образуется суммой сдвижек $\sum \ln a_i$ экспериментальных кривых при заданных факторах, ускоряющих ползучесть. Обобщенная кривая податливости получается при наименьшем влиянии фактора, ускоряющего ползучесть. Для ее прогноза при всех значениях указанного фактора используется зависимость $\sum \ln a_i$ от приращения величин данного фактора по сравнению с обобщенной кривой (см. рис. 11).

При экспериментальном установлении не только горизонтальной, но и вертикальной сдвигки кривых податливости (рис. 10, кривая 2) разработан метод учета этой сдвигки.

Для использования метода временных аналогий для прогноза длительной прочности по данным экспериментов в пределах опытного периода определяется коэффициент редукиции a_i . Прогнозный период также, как и при прогнозе деформации, может во много раз превышать опытный и соответствовать срокам эксплуатации сооружений (рис. 11).

Принципиальная возможность использования метода временных аналогий для определения длительной прочности мерзлых грунтов показана для различных видов испытаний, в том числе и для условий сложного напряженного состояния [4; 26].

Порядок обработки опытных данных показан на примере результатов определения эквивалентного сцепления мерзлого торфа (рис. 12). По опытным данным восьмичасовых испытаний строится семейство кривых в полулогарифмическом масштабе. Определяются временные сдвигки $\ln a_i$. Затем опытные точки переносятся на соседний график, первая кривая — без изменения коор-

динат. Опытные точки следующих кривых сдвигаются вправо по временной оси на $\sum \ln a_i$, находим уравнение обобщенной кривой, и по температурной зависимости $\sum \ln a_i$ определяем длительную прочность при любой температуре в пределах опытной.

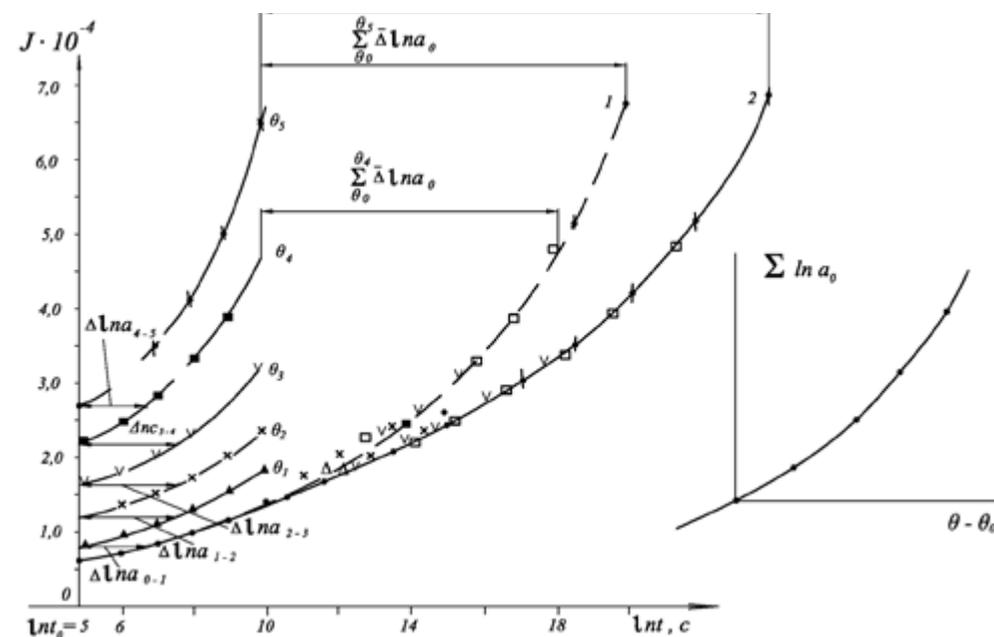


Рис. 11. Семейство кривых податливости мерзлого верхнего пушицево-сфагнового торфа при одноосном сжатии и различной температуре, обобщенные кривые, построенные в предположении различного характера терморейологического простого (1) и сложного (2) деформирования, и зависимость $\sum \Delta \ln a_i$ от $(\theta_i - \theta_0)$; $\theta_0 = -13$; $\theta_1 = -8.5$; $\theta_2 = -6.5$; $\theta_3 = -4.5$; $\theta_4 = -2.5$; $\theta_5 = -1$, $^\circ\text{C}$

Рассмотренные методы определения длительной деформации и прочности основаны на теориях предельных состояний. Многими авторами делается попытка рассматривать процесс ползучести и разрушения мерзлых грунтов на основе кинетической теории прочности [23; 27; 28; 29 и др.]. Ввиду многокомпонентности протекания активных фазовых переходов в мерзлых грунтах применить кинетическую концепцию к получению прогнозных уравнений ползучести и прочности мерзлых грунтов весьма сложно. Во многих этих работах остается статистический подход при решении данной проблемы. В работе Л.Т. Роман [4; 6] результаты экспериментальных определений ползучести и разрушения мерзлых грунтов, рассмотренные на основе теории С.Н. Журкова о кинетической природе прочности твердых тел [30; 31], анализируются с позиций потери долговечности и скорости ползучести. Установлена взаимосвязь между данными процессами — лианизированные зависимости снижения прочности и скорости ползучести отражаются зеркально. На рис. 13 приведен пример указанных зависимостей на основе экспериментальных данных [32]. Их анализ позволил получить уравнения длительной прочности и ползучести, энергии активации процесса разрушения (табл. 7) [4].

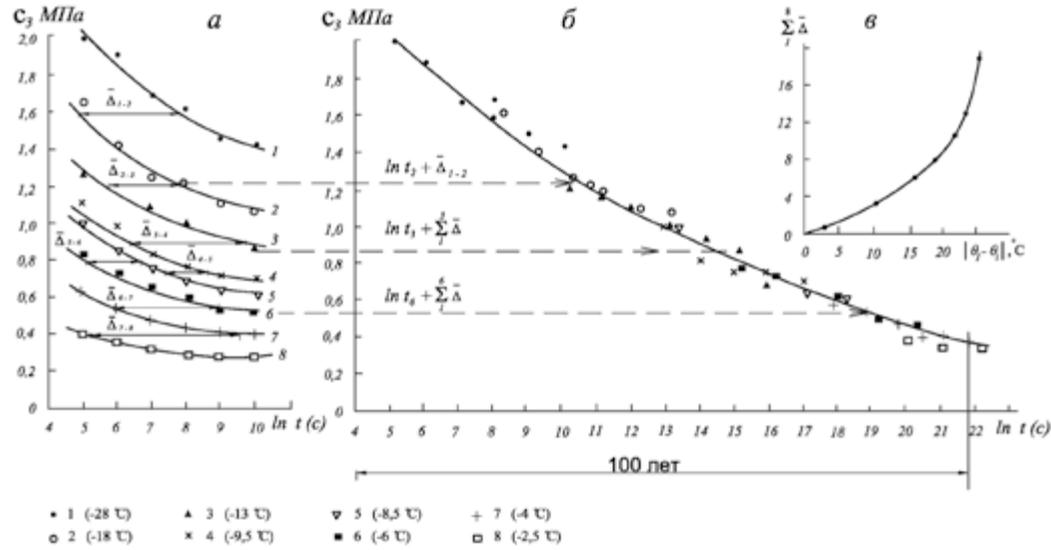


Рис. 12. Пример построения обобщенной кривой длительного эквивалентного сцепления для мерзлого торфа методом температурно-временной аналогии:

- а) – опытные зависимости $c_3 - \ln t$;
- б) – обобщенная кривая $c_3 - \ln t$ (для $\theta = 25^\circ\text{C}$),
- в) – зависимость $\sum_0^{\infty} \Delta - |\theta_1 - \theta_f|$

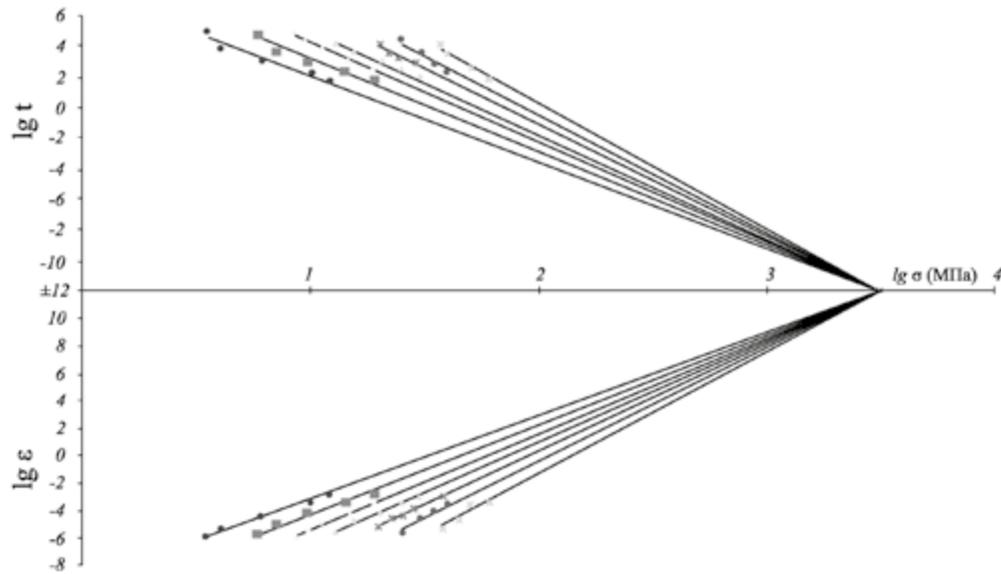


Рис 13. Зависимость $\lg(t) - \lg(\sigma)$, $\lg(\epsilon) - \lg(\sigma)$ для мерзлого ила при температуре от $-0,5$ до -10 . Обработка данных по [32]

Таблица 7.

Прогнозные уравнения длительной прочности и долговечности мерзлых грунтов

$\sigma_t = \frac{\sigma_0}{(t/t_0)^\beta}$	$\sigma_t = \frac{\sigma_0}{(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^\beta}$
$U_\sigma = 2,3RT\beta(\lg t - \lg t_0)$	$U_\epsilon = 2,3RT\beta(\lg \dot{\epsilon} - \lg \dot{\epsilon}_0)$

Примечание. σ_t – прочность на период времени t ;
 σ_0 – значение напряжения в координате полюса; $t_0 = 10^{-13}$ – 10^{-12} период колебаний атомов;
 β – наклон прямых $\lg \sigma_t - \lg t$ и $\lg \dot{\epsilon} - \lg \sigma$;
 $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации;
 $\dot{\epsilon}_0$ – скорость деформации в координате полюса ($\lg \dot{\epsilon}_0 = 12 (c - 1)$);
 U_σ и U_ϵ – энергии активации процесса разрушения и скорости деформации, соответственно;
 R – универсальная газовая постоянная;
 T – абсолютная температура, К

ДЕФОРМАЦИЯ И ПРОЧНОСТЬ ОТТАИВАЮЩИХ ГРУНТОВ

Строение мерзлых грунтов (структура и текстура) существенно влияют на деформацию и формирование физических и механических свойств при оттаивании. Льдистые грунты всегда дают просадки. Коэффициент пористости их резко снижается в процессе оттаивания. Указанное снижение проявляется в меньшей мере в песчаных, чем в глинистых грунтах. В качестве примера на рис. 14 приведены компрессионные кривые талых грунтов и тех же грунтов после замораживания и оттаивания при одной и той же уплотняющей нагрузке. Из сопоставления компрессионных кривых видно, что наибольшее изменение коэффициента пористости происходит в процессе оттаивания, что и определяет осадки при оттаивании. Существенное влияние оказывает давление, при котором происходит оттаивание.

Многими отечественными и зарубежными учеными установлены закономерности, позволяющие рассчитать осадки оттаивающих грунтов на основании показателей простейших физических свойств (табл. 8). Полученные закономерности могут быть использованы для приближенной оценки осадок, т.к. они обусловлены многими факторами, не поддающимися количественному определению. К таким факторам относятся структура и текстура грунта (которые могут существенно отличаться при одинаковых физических характеристиках), набухание частиц грунта, физико-химические процессы, широкий диапазон дисперсности в пределах каждого вида грунта и т. д. При этом большее число формул учитывает только осадки при свободном оттаивании (без внешней нагрузки). Следует отметить хорошую достоверность формулы (9) В.П. Ушкалова [39], которая получена на основе обработки данных большого числа полевых испытаний, что позволяет назначить коэффициенты для основных видов дисперсных грунтов при давлении 0.1 и 0.3 МПа (табл. 8).

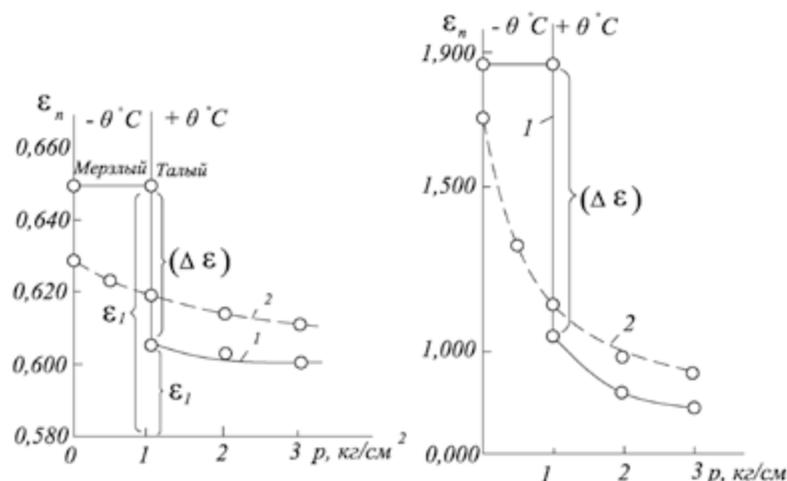


Рис. 14. Компрессионные кривые оттаивающих (1) и талых грунтов (2); а – песок, б – глина

Таблица 8.

Расчетные формулы для определения осадки (S) оттаивающих грунтов

Формулы	Авторы
$S = k_1 \frac{\rho_s W}{\rho_s W + 1} \cdot h$	(1) Федосов А.Е.
$S = 1,09 \frac{(W - W_p) \rho}{(1 - W) \rho_w} \cdot h$	(2) Гольдштейн М.Н.
$S = \frac{\rho_s (W_c - W_m)}{1 + \rho_s W_c} \cdot h$	(3) Пчелинцев А.М.
$S = \frac{(1 + 0,09i)W - W_m}{(1 + 0,09i)W - W_m + \frac{\rho_w}{\rho_{df}}}$	(4) Бакулин Ф.Г., Жуков В.Ф.
$S = \left\{ 1 - \rho_{df} \left[\frac{1}{\rho_s} + \frac{1}{\rho_w} (W_p + k_3 I_p) \right] \right\} \cdot h$ (глинистый грунт)	(5) Киселев М.Ф.
$S = (m e_f k_4 + b) \cdot h$	(6) Ушкалов В.П.
$S = \frac{\rho_s (W - \rho_i W_p) h}{\rho_i + W \rho_s} + 0,5 h_i$	(7) Давыдочкин А.Н.

Формулы	Авторы
$S = \frac{k_s W}{2,7W + 0,9}$	(8) Вотяков И.Н.
$S = \frac{W_f (1 + 0,09i) - W_{th}}{(1,09W_f - 0,09W_{df}) / e_f + W_f (1 + 0,09i)} \cdot h$	(9) Crory F.
$S = [0,736 - 1,018 \ln \rho_f \pm 0,07] \cdot h$ Для илов	(10) Speer T.L., Watson G.H.
$S = \left[0,80 - 0,868 \left(\frac{\rho_{df}}{\rho_w} - 1,15 \right)^{1/2} \pm 0,05 \right] \cdot h$	(11) Watson G.H., R.K. Rowley, W.A. Slusarchuk
$S = \left[0,80 - 0,685 \left(\frac{\rho_{df}}{\rho_w} - 0,241 \right)^{1/2} \pm 0,05 \right] \cdot h$ Песок	(12) Keil L.D., Nilsen N.M., Gupta R.C.
$S = \left[0,90 - 0,691 \left(\frac{\rho_{df}}{\rho_w} - 0,236 \right)^{1/2} \pm 0,05 \right] \cdot h$ Глина	(13) Keil L.D., Nilsen N.M., Gupta R.C.
$A = 0,416 - 0,23 \rho_d$ Песок	(14) Котов П.И.
$A = 0,32 - 0,187 \rho_d + 0,32 \frac{W - W_p}{S_r}$ Супесь	(15) Котов П.И.
$A = 0,23 - 0,145 \rho_d + 0,393 \frac{W - W_p}{S_r}$ Суглинок	(16) Котов П.И.

Примечание. Условные обозначения в формулах (1) – (16): ρ – плотность мерзлого грунта, г/см^3 ; ρ_i – плотность льда г/см^3 ; ρ_s – плотность частиц грунта г/см^3 ; ρ_d – плотность скелета мерзлого грунта г/см^3 ; ρ_{dth} – плотность скелета грунта после оттаивания под давлением 0,2–0,5 МПа; W_{tot} – весовая влажность, доли ед.; W_f – влажность мерзлого грунта, доли ед.; W_p – влажность на пределе пластичности, доли ед.; W_w – влажность за счет незамерзшей воды, доли ед.; W_{th} – влажность оттаявшего грунта, доли ед.; S_r – степень воднасыщения, д.е.; W_m – влажность минеральных частиц, доли ед.; m, b – параметры (таблица 9); I_p – число пластичности; i – льдистость; h – мощность оттаянного слоя, см; h_i – мощность ледяных включений, см; e_f – коэффициент пористости мерзлого грунта; k_1, k_2 – эмпирические коэффициенты (для песка $k_1 = 0,1$, для суглинка $k_1 = 0,05$; $k_2 = 0,8$); k_3 – коэффициент пропорциональности (таблица 10); k_4 – поправочный эмпирический коэффициент, учитывающий отклонения отдельных значений осадок от средних значений, равный 0,95 для суглинков и 1,3 для песчаных грунтов; k_5 – эмпирический коэффициент, зависящий от вида грунта, влажности и уплотняющего давления

Таблица 9.

Значения параметров m и b

Вид грунта	Значения коэффициентов m и b при давлении, МПа			
	0,1		0,3	
	m	b	m	b
Суглинок	0,0878	0,0205	0,1109	0,0632
Супесь	0,0779	0,0224	0,1050	0,0612
Песок	0,0880	0,0013	0,1129	0,0296
Гравийный грунт	0,0878	0,0089	0,1123	0,0122

Таблица 10.

Значения K_3 в зависимости от вида грунта и уплотняющего давления

Грунт	Число пластичности	K_3 для различных уплотняющих давлений МПа, (кгс/см ²)							
		0,05(0,5)	0,075(0,75)	0,1(1)	0,2(2)	0,3(3)	0,4(4)	0,5(5)	0,6(6)
Супесь	$I_p \leq 0,03$	2,5	2,0	1,6	1,3	1,1	0,9	0,8	0,7
	$0,03 < I_p \leq 0,05$	2,0	1,6	1,3	1,1	0,9	0,8	0,7	0,55
	$0,05 < I_p \leq 0,07$	1,7	1,4	1,2	1,0	0,8	0,75	0,65	0,5
Суглинок	$0,07 < I_p \leq 0,09$	1,5	1,3	1,1	0,9	0,75	0,7	0,6	0,45
	$0,09 < I_p \leq 0,13$	1,3	1,2	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
	$0,13 < I_p \leq 0,17$	1,2	1,1	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4	0,35
Глина	$0,17 < I_p \leq 0,21$	1,1	1,0	0,8	0,6	0,5	0,45	0,35	0,3
	$0,09 < I_p \leq 0,26$	1,0	0,9	0,7	0,5	0,4	0,4	0,3	0,25
	$0,13 < I_p \leq 0,32$	0,9	0,8	0,6	0,4	0,35	0,35	0,25	0,2
	$I_p \leq 0,32$	0,8	0,7	0,5	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15

Все расчетные формулы для определения осадок оттаивающих грунтов по показаниям характеристик физических свойств являются приближенными, так как невозможно численно учесть влияние криогенной текстуры, гранулометрического и минерального состава, генезиса, физико-химических, миграционных процессов. Поэтому рассмотренные уравнения позволяют прогнозировать осадки при оттаивании лишь для ориентировочных оценок. Однако анализ полученных формул наглядно показывает, какие из физических свойств мерзлых грунтов наиболее существенно определяют собой осадки при оттаивании. Как можно видеть, такие свойства характеризуются прежде всего показателями плотности (плотность мерзлого грунта, скелета грунта, частиц грунта), затем показателями влажности (суммарная влажность мерзлого грунта, льдистость, влажность за счет незамерзшей воды). С увеличением плотности осадки при оттаивании уменьшаются, а с увеличением влажности и льдистости — уве-

личиваются. Влияние дисперсности учитывается введением в некоторые формулы показателя влажности на пределе пластичности, числа пластичности.

Кроме того, следует учитывать, что осадки оттаивания и уплотнения связаны со скоростью оттаивания, формированием посткриогенной текстуры и проявлением процесса ползучести, развивающегося во времени.

Процесс протекания осадок мерзлых грунтов при их оттаивании не заканчивается в момент прекращения оттаивания, а продолжает развиваться во времени. Характер его развития, скорость затухания зависят от свойств оттаивающих грунтов, величины внешней нагрузки, а также от скорости режима оттаивания, т.е. температурного режима нагреваемой поверхности грунта.

По известным решениям теплофизики для условий одномерной задачи глубина оттаивания h прямо пропорциональна корню квадратному от времени оттаивания t :

$$h = \beta_i \sqrt{t}, \quad (14)$$

где β_i — тепловой коэффициент, зависящий от теплопроводности, теплоемкости, количества тепла на фазовые переходы, температуры на поверхности оттаивающего грунта и т.д.

Осадки во времени оттаивающего грунта S_i пропорциональны глубине оттаивания, т.е. в конечном счете пропорциональны \sqrt{t} :

$$S_i = \alpha \sqrt{t}. \quad (15)$$

Осадка крупноскелетных и крупнозернистых песчаных (водопроницаемых) грунтов практически полностью реализуется в процессе оттаивания.

Прогноз протекания осадок во времени при оттаивании дисперсных грунтов должен учитывать возможность неполной консолидации в процессе оттаивания под влиянием нагружения. При этом следует выделять уплотнение за счет фильтрационной консолидации, обусловленной оттоком влаги, и вторичной консолидации при уплотнении частиц грунта.

Инженерный метод прогноза осадок базируется на принятии линейного распределения уплотняющих давлений по глубине оттаивающего слоя грунта за весь период оттаивания, как в случае одномерной, так и пространственной задачи, и принятии условия применимости теории фильтрационной консолидации к оттаивающим водонасыщенным грунтам. Постулаты и аналитические решения такого подхода базируются на теоретических и экспериментальных данных [44, 45].

При проектировании фундаментов и оснований на оттаивающих грунтах (II принцип в соответствии со строительными нормами и правилами) расчеты осадок должны выполняться на основе экспериментально определенных деформационных характеристик.

В настоящее время приняты две основные характеристики деформационных свойств оттаивающих грунтов, установленные Н.А. Цытовичем на основе анализа уменьшения пористости при оттаивании и уплотнении:

- коэффициент оттаивания (A , д.е.), равный относительной осадке грунта при оттаивании в условиях отсутствия внешней нагрузки;
- коэффициент сжимаемости (m , МПа⁻¹), равный отношению приращения относительной условно стабилизированной деформации $\Delta \varepsilon$ к приращению напряжения от внешней нагрузки ($\Delta \sigma$, МПа), т.е. $m = \Delta \varepsilon / \Delta \sigma$.

Значения указанных характеристик определяются ступенчатым нагружением: в лабораторных условиях – при компрессионном уплотнении либо полевыми испытаниями горячим штампом.

В соответствии с СП 2513330.2012 [46] осадка оттаявшего и уплотненного грунта включает две составляющие:

$$S = S_{th} + S_{\sigma,k}, \quad (16)$$

где S_{th} – составляющая осадки, обусловленная действием собственного веса оттаявшего грунта; $S_{\sigma,k}$ – составляющая осадки, обусловленная дополнительным давлением на грунт от действия веса сооружения.

Составляющая осадки S_{th} определяется:

$$S_{th} = \sum_1^n (A_i + m_i \sigma_{z,g,i}) h_i, \quad (17)$$

где A_i и m_i – соответственно коэффициенты оттаивания (доли единицы) и сжимаемости (МПа^{-1}), полученные экспериментально; $\sigma_{z,g,i}$ – вертикальное напряжение от собственного веса грунта в середине i -го слоя, определяемое расчетом для глубины Z_i от уровня планировочных отметок с учетом взвешивающего действия воды; h_i – толщина i -го слоя оттаивающего грунта, см.

Составляющая осадки S_{σ} при расчетной схеме основания в виде линейно-деформируемого слоя конечной толщины определяется по формуле:

$$S_{\sigma,k} = \sigma_0 b K_h \sum_i^n m_i K_{\mu,i} (K_i - K_{i-1}), \quad (18)$$

где σ_0 – дополнительное вертикальное давление на основание под подошвой фундамента, МПа; b – ширина подошвы фундамента, см; K_h – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения Z/b , где Z – расстояние от подошвы фундамента до нижней границы зоны оттаивания или кровли непросадочного при оттаивании грунта, см; m_i – коэффициент сжимаемости i -го слоя грунта, МПа^{-1} ; $K_{\mu,i}$ – коэффициент, определяемый в зависимости от отношения Z/b , где Z – расстояние от подошвы фундамента до середины i -го слоя грунта, см; K_i и K_{i-1} – коэффициенты, определяемые в зависимости от отношения $l, b, Z_i/b, Z_{i-1}/b$, где Z_i и Z_{i-1} – расстояние от подошвы фундамента соответственно до подошвы и кровли i -го слоя грунта; l – длина подошвы фундамента, см.

Значения коэффициентов, входящих в уравнение (18), приведены в таблицах [46]. Рассмотренный способ расчета осадок оттаивающих грунтов требует определения деформационных характеристик A и m , как в лабораторных, так и полевых условиях, с доведением уплотнения до условной стабилизации. Развитие осадок во времени необходимо определять с учетом скорости оттаивания грунтов, а также с учетом фильтрационной консолидации и вторичной консолидации, методика которых приведена в [44, 45].

В работе П.И. Котова [47] решены важные методические проблемы определения деформационных характеристик оттаивающих грунтов. Обоснована возможность их установления при компрессии в условиях всестороннего оттаивания. Разработаны две экспресс-методики расчета осадок оттаивающих грунтов под действием природного давления. Показана возможность использовать

сокращенный период испытаний при оттаивании. Выполнено сопоставление значений деформационных характеристик, определяемых в лабораторных и полевых условиях (табл. 11).

Таблица 11.
Сопоставление значений деформационных характеристик оттаивающих грунтов, определенных в лабораторных и полевых условиях

Авторы	Район	Грунт	$A_k/A_{ш}$	$m_k/m_{ш}$
П.Д. Бондарев	Салехард	глинистый	–	1,4–3,0
Г.В. Порхаев	Воркута	глинистый	–	1,3–1,8
В.П. Ушкалов	Забайкалье	глинистый	1,1–1,5	1,1–1,3
В.В. Докучаев	–	песок	5,0	–
В.Д. Пономарев	–	глинистый	10,0	–
Л.Н. Хрусталеv	Воркута	суглинок	1,8–2,0	1,2–1,3
		песок	1,1–1,3	1,0–1,2
В.А. Сорокин	Воркута	глинистый	1,1–3,0	1,3–5,0
		песок	1,0–2,0	1,4–2,7
А.А. Колесов	Западная Сибирь	песок	1,0–1,1	1,0–1,1
Г.И. Пахомова	Усть-Илим	суглинок	1,1–1,2	1,1–1,2

Примечание: отношение коэффициентов оттаивания $A_k/A_{ш}$ и сжимаемости $m_k/m_{ш}$, определенных в лабораторных ($A_k; m_k$) и полевых ($A_{ш}; m_{ш}$) условиях

Как можно видеть, коэффициенты сжимаемости, полученные в лабораторных условиях, могут быть как одинаковы, так и более чем в 3 раза превышать таковые по сравнению с полевыми определениями. Меньшие несовпадения полевых и лабораторных данных наблюдаются в песчаных грунтах [48].

Остается мало исследованной проблема формирования прочностных характеристик в процессе оттаивания и уплотнения грунтов. Нормативными документами при расчете несущей способности оснований их значения допускается принимать равными таковым для талых грунтов. Такой подход возможен только в том случае, если расчетные характеристики будут определены после стабилизации фильтрационной и вторичной консолидации оттаявших грунтов. Прочностным характеристикам грунтов, формирующимся в процессе оттаивания, посвящено большое число исследований. Их обзор анализируется многими авторами, в том числе, в работе [49]. Здесь особо следует выделить оценку наиболее низкой прочности на границе оттаивания, связанной со скоплением воды, возникновением порового давления влаги, что наглядно иллюстрируется данными табл. 12.

Таблица 12.

Прочностные характеристики (сцепление, угол внутреннего трения) оттаявших грунтов и на границе оттаивания [49]

Вид грунта	Начальная влажность W_{0tot} , %	Начальная степень водонасыщения S_r	Показатели сопротивления сдвигу грунта			
			оттаявшего		на границе оттаивания	
			C_{fch} , МПа	φ_{fch} , °	C_{th} , МПа	φ_{th} , °
Песок	8	0,48	0,010	34	0,002	30
	17	0,75	0,008	32	0,001	28
	32	0,99	0,004	23	0,000	22
Супесь	15	0,58	0,021	19	0,016	17
	17	0,62	0,014	17	0,008	15
	23	0,70	0,007	16	0,005	11
Суглинок	15	0,75	0,020	24	0,016	22
	20	0,78	0,017	21	0,012	18
	28	0,81	0,008	17	0,004	12
Глина	20	0,68	0,030	15	0,022	16
	29	0,79	0,020	13	0,014	12
	44	0,80	0,011	12	0,006	10

Формирование прочностных характеристик в процессе оттаивания на границе талого и мерзлого слоя в фиксируемые моменты времени необходимо при прогнозе устойчивости оттаивающих оснований сооружений, откосов, солифлюкции и др. Схема к расчету устойчивости откосов приведена на рис. 15.

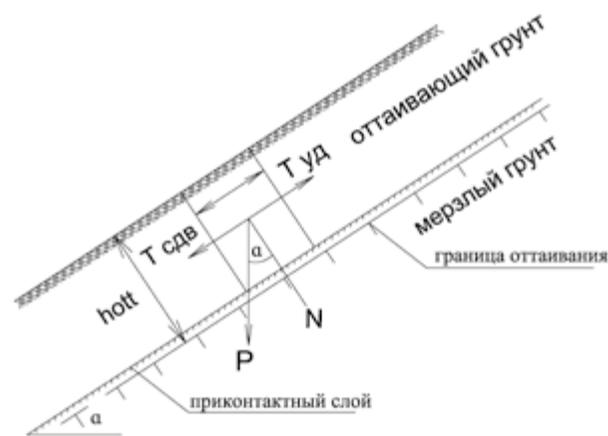


Рис. 15. Схема к расчету устойчивости оттаивающего откоса методом наклонных сил

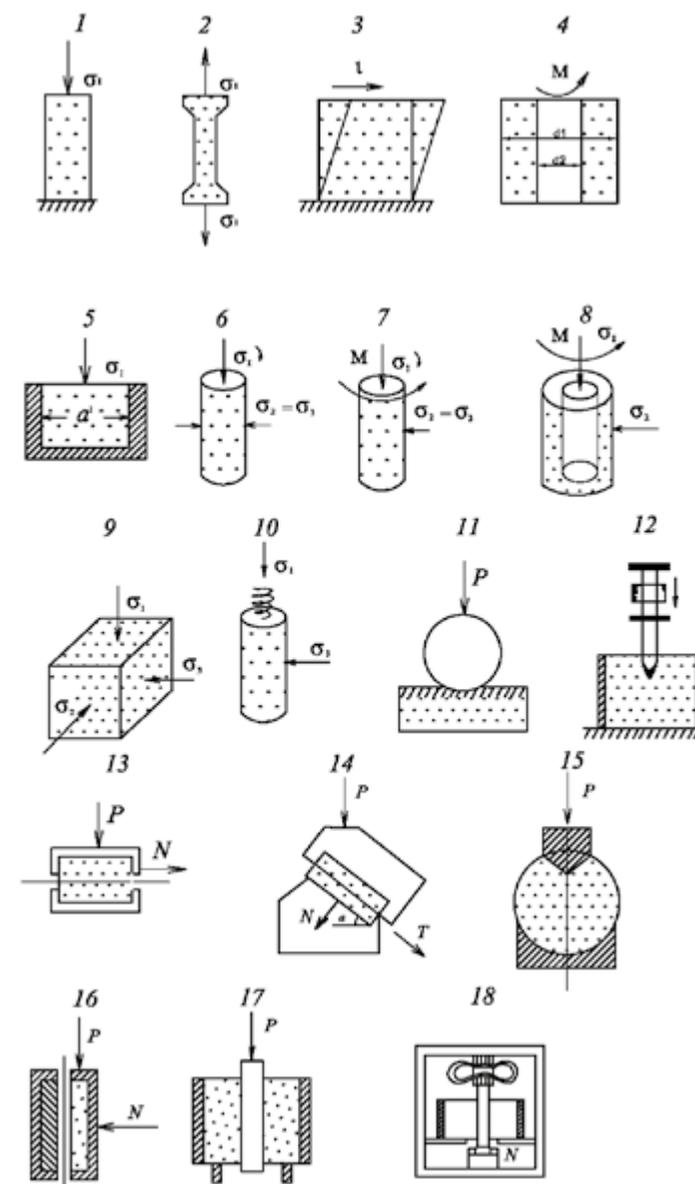


Рис. 16. Схемы лабораторных испытаний для определения механических свойств мерзлых грунтов: 1 – одноосное сжатие, 2 – разрыв, 3 – сдвиг, 4 – сдвиг при кручении, 5 – компрессия, 6 – осесимметричное трехосное сжатие вертикальной и радиальной нагрузкой, 7 – осесимметричное трехосное сжатие с кручением, 8 – осесимметричное трехосное сжатие полого цилиндра с кручением, 9 – трехосное сжатие с независимым заданием трех главных напряжений, 10 – динамометрическое испытание в релаксационно-ползучем режиме, 11 – вдавливание сферического штампа, 12 – погружение зонда, 13 – сдвиг на срезном приборе, 14 – сдвиг на клиновом приборе, 15 – раздавливание образца, 16 – сдвиг по поверхности смерзания в срезном приборе, 17 – сдвиг мерзлого грунта по поверхности модели сваи, 18 – сдвиг с заданной скоростью смороженной модели сваи

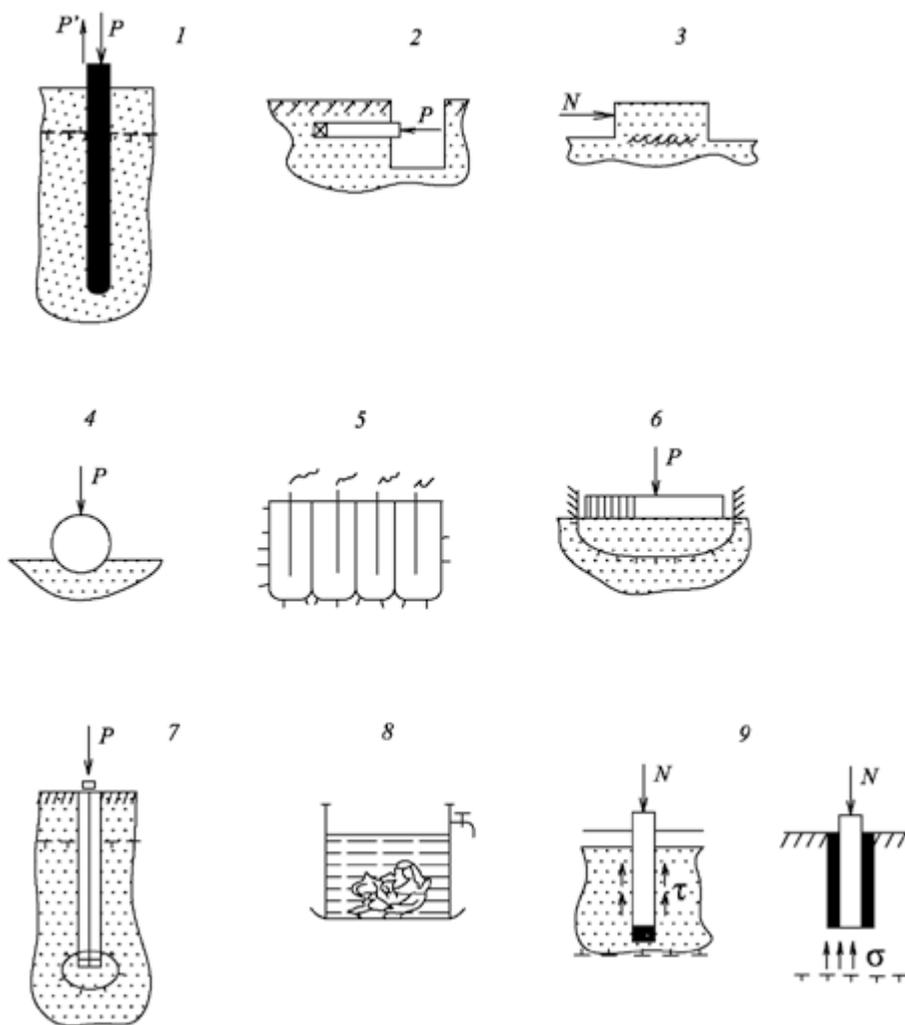


Рис. 17. Схемы полевых испытаний мерзлых и оттаивающих грунтов:

- 1 – вдавливание и выдергивание свай, 2 – сдвиг по поверхности смерзания, 3 – сдвиг целика, 4 – вдавливание сферического штампа, 5 – определение осадки при оттаивании массива грунта, 6 – вдавливание горячего штампа на поверхности или в шурфе, 7 – то же, но в скважине, 8 – комплексное определение основных физических свойств методом оттаивания монолитов, 9 – определение нормальных и касательных сил пучения

Устойчивость обеспечивается недопущением сдвиговых деформаций по поверхности скольжения из условия превышения или равенства удерживающих сил $T_{уд}$ по сравнению со сдвигающими: $T_{уд} > T_{сдв}$. При рассмотрении устойчивости отдельного оттаивающего блока [50] коэффициент устойчивости η определяется равенством:

$$\eta = \frac{\rho_{omm} h_{omm} l_i \cos \alpha_i t g \varphi_{th} + l_i c_{th}}{\rho_{omm} h_{omm} l_i \sin \alpha_i}, \quad (19)$$

где η – коэффициент устойчивости; α_i – угол наклона склона; ρ_{omm} – плотность оттаивающего грунта, кг/м³; h_{omm} – мощность оттаявшего слоя в отсеке, м; l_i – длина отсека, м; C_{th} – сцепление оттаивающего грунта, МПа; φ_{th} – угол внутреннего трения оттаивающего грунта, °.

ВЫВОДЫ

Краткое изложение закономерностей формирования физико-механических свойств промерзающих, мерзлых и оттаивающих грунтов позволяет установить, что основными из них являются следующие.

1. Динамика изменения фазового состояния поровой влаги в процессе промерзания, понижения отрицательной температуры и ее повышения при оттаивании обуславливает нестабильность физико-механических свойств.
2. Формирование напряженно-деформированного состояния при промерзании и оттаивании, приводящее к проявлению криогенных процессов, таких как пучение, температурное растрескивание, термокарст, солифлюкция и др., зависит не только от состава и физических свойств грунтов, но и температурного режима окружающей среды.
3. Проявление мерзлыми грунтами реологических свойств (ползучести, релаксации напряжений, снижения прочности во времени) требует прогноза деформационных и прочностных характеристик на основе опытных параметров на период использования грунтов как оснований сооружений.
4. Полученные закономерности зависимости осадок оттаивающих грунтов от состава и физических свойств не учитывают криоструктуру и текстуру грунтов, которые могут существенно отличаться при одних и тех же физических характеристиках; широкий диапазон дисперсности в пределах каждого вида грунта; физико-химические процессы и т. д. Прогноз осадок и прочности оттаивающих грунтов необходимо производить с учетом периода фильтрационной и вторичной консолидации.
5. Расчет деформаций, несущей способности оснований сооружений, прогноз криогенных процессов в области криолитозоны возможен только по данным экспериментального определения нормативных и расчетных характеристик и их прогноза на заданный период времени. Основные схемы лабораторных и полевых испытаний приведены на рис. 16 и 17. Методики испытаний и обработки опытных данных изложены в соответствующих разделах настоящего Пособия.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Андрианов П.И. Температура замерзания грунтов. М.: Изд-во АН СССР, 1936. 16 с.
- [2] Боженова А.П. Инструктивные указания по лабораторным методам определения температур переохлаждения и начала замерзания грунтов. / Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов. Сб. 2 М., Л.: Изд-во АН СССР, 1954. С. 16–32.
- [3] Еришов Э.Д., Мотенко Р.Г., Комаров И.А. Экспериментальное исследование теплофизических свойств и фазового состава влаги засоленных мерзлых грунтов. "Геоэкология", М., "Наука", № 3, 1999. С. 232–242.

- [4] Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов. М.: МАИК, 2002. 426 с.
- [5] Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 446 с.
- [6] Роман Л.Т. Мерзлые торфяные грунты как основания сооружений. М.: Наука, 1987. 220 с.
- [7] Нерсесова З.А. Инструктивные указания по лабораторным методам определения температур переохлаждения и начала замерзания грунтов. / Материалы по лабораторным исследованиям мерзлых грунтов. Сб. 2 М.,Л.: Изд-во АН СССР, 1954. С. 55–77.
- [8] Коновалов А.А., Роман Л.Т. К определению эффективной теплоемкости промерзающих и оттаивающих грунтов / Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. Вып. 23. Красноярск: КрасПСНИИП, 1972. С. 178–186.
- [9] Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 471 с.
- [10] Пузаков Н.А. Теоретические основы накопления влаги в дорожном полотне и их практическое применение. М.: Дориздат, 1948.
- [11] Золотарь И.А. Расчет промерзания и величины пучения с учетом миграции влаги. / Процессы тепло- и массопереноса в горных породах. М.: Наука, 1965. С. 19–25.
- [12] Иванов Н.С. Тепло- и массоперенос в мерзлых породах. М.: Наука, 1969. 239 с.
- [13] Фельдман Г.М. Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах. Новосибирск: Наука, 1988. 257 с.
- [14] Орлов В.О. Криогенное пучение тонкодисперсных грунтов. М.: Изд-во СССР, 1962. 188 с.
- [15] Далматов Б.И. Исследование касательных сил пучения и влияния их на фундаменты сооружений. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 60 с.
- [16] Достовалов Б.Н. О физических условиях образования морозобойных трещин и развития трещинных льдов в рыхлых породах / Исследование вечной мерзлоты в Якутской республике. Вып. 3, 1952. С. 162–194.
- [17] Lachenbruch A.H. Mechanics of thermal contraction cracks and ice-wedge polygons in permafrost. Geol. Soc. America. Paper, 1962. № 70. 70 p.
- [18] Гречищев С.Е., Чистотин Л.В., Шур Ю.Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. М.: Изд-во Недра, 1980. 382 с.
- [19] Шушерина Е.П., Рачевский Б.С., Отрощенко О.П., Исследование температурных деформаций мерзлых горных пород. / Мерзлотные исследования. М.: Изд-во МГУ, Вып. X, 1970. С. 273–283.
- [20] Роман Л.Т., Мерзляков В.П., Малеева А.Н. Взаимосвязь температурных деформаций и сопротивления сдвигу мерзлых грунтов. / Криосфера Земли. № 3, 2017. С. 72–84
- [21] Вялов С.С. Реологические свойства и несущая способность мерзлых грунтов. Изд-во АН СССР, 1959.—190 с.
- [22] Вялов С.С., Гмошинский В.Г., Городецкий С.Э. Григорьева В.Г., Зарецкий Ю.К., Пекарская Н.К., Шушерина Е.П. Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты ледогрунтовых ограждений. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 254 с.
- [23] Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
- [24] Вялов С.С. Реология мерзлых грунтов. М.: Стройиздат, 2000. 464 с.
- [25] Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров. М.: Изд-во ин. лит, 1953. 535 с.
- [26] Roman L.T. Perspectives using time analogy methods for determination of long-term strength and strain of frozen soils. / Proc. 7-th Int. Congress Int. Association of Engineering Geology, V., Lisboa, Portugal, 1994ю Pp. 1007–1015.
- [27] Коновалов А.А. К теории прочности мерзлых грунтов / Матер. Второй конференции геокриологов России. Том 1. М.: Изд-во МГУ, 2001. С. 114–120.
- [28] Fish A.M. Kinetic nature of the long term strength of frozen soils. / Proc. of 2-nd Inter. Symp. on Ground Freezing. Tondheim. Norway, 1980. Pp. 95–108.

- [29] Брушков А.В. Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождения и свойства. М.: Изд-во МГУ, 1998. 330 с.
- [30] Журков С.Н. Вестник АН СССР, 1957. Т. XIII. 78 с.
- [31] Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
- [32] Zhu Y., Carbee D.L. Uniaxial compressive strength of frozen silt under constant deformation rates / Cold Regions Science and Technology, 1984. V. 8. Pp. 3–15.
- [33] Федосов А.Е. Прогноз осадок сооружений при оттаивании грунтов оснований. / Тр. Инст-та мерзлотоведения. Т. 4, 1944. С. 93–124.
- [34] Гольдштейн М.Н. Деформации земляного полотна и оснований сооружений при промерзании и оттаивании. М.: Трансжелдориздат, 1948. 212 с.
- [35] Пчелинцев А.М. Строение и физико-механические свойства мерзлых грунтов. М.: Наука, 1964. 158 с.
- [36] Бакулин Ф.Г., Жуков В.Ф. Деформации мерзлых дисперсных грунтов при оттаивании. / Извест. АН СССР, 1955. № 7С. 86 –116.
- [37] Киселев М.Ф. Способ определения относительного сжатия мерзлых грунтов при оттаивании их под нагрузками по простейшим физическим характеристикам / Сб. НИИоснований и подземных сооружений. №19. М.: Госстройиздат, 1952. С. 3–12.
- [38] Crory F.S. Settlement Associated with the Thawing of Permafrost. / Proc. 2-ed Conf. on Permafrost. Yakutsk, 1973. P. 599–607.
- [39] Ушкалов В.П. Исследование работы протаивающих оснований и их расчет по предельным деформациям сооружений. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 218 с.
- [40] Давыдовкин А.Н. Полевая оценка льдистости и просадочности мерзлых глинистых грунтов. / Тр. совещ. по инжен. геол. свойствам горных пород, 1957. Т. II. С. 249 –254.
- [41] Вотяков И.Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии. Новосибирск: Изд-во Наука, СО АН СССР, 1975. 175 с.
- [42] Speer T.L., Watson G.H., Rowly R.C. Effects of ground ice variability and resulting thaw settlement on buried warm oil pipeline. North. Am. Contrib. / Proc. of 2-nd Inter. Conf. on Permafrost. Yakutsk. USSR, 1973. P. 746–751.
- [43] Зарецкий Ю.К. Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений. М.: Стройиздат, 1988. 347 с.
- [44] СП 25 13330. 2012. Основания и фундаменты а вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2. 02. 04–88.М.: Минрегион России. 150 с.
- [45] Котов П.И. Компрессионное деформирование прибрежно-морских мерзлых грунтов при оттаивании (Европейский Север России, Западная Сибирь). М.: 2014. а /р. диссерт. на соиск. уч. степ. к. г-м. н. 23 с.
- [46] Котов П.И., Роман Л.Т., Сахаров И.И., Парамонов В.Н., Парамонов М.В. Влияние условий оттаивания на деформационные характеристики оттаивающих грунтов. / Основания, фундаменты и механика грунтов. М.: 2015. № 5, С. 8 –13.
- [47] Царанов М.Н. Закономерности формирования прочностных характеристик оттаивающих грунтов при сдвиге. М.: 2008. а/р. диссерт. на соиск. уч. степ. к. г-м. н. 21 с.
- [48] Бондаренко Г.И. Исследование сопротивления сдвигу и влажности сезоннооттаивающих грунтов откосов и склонов / Реология грунтов и инженерное мерзлотоведение. М.: Изд-во «Наука», 1982. С. 112–124.

II. Лабораторные методы испытаний мерзлых грунтов

II.1. Определение состава и физических свойств мерзлых грунтов (П.И. Котов)

Помимо характеристик, предусмотренных для талых грунтов, для мерзлых и оттаивающих грунтов определяют дополнительно следующие характеристики [1]:

- вид криогенной текстуры;
- суммарная влажность мерзлого грунта W_{tot} ;
- влажность мерзлого грунта между включениями льда W_m ;
- влажность мерзлого грунта за счет незамерзшей воды W_w ;
- влажность мерзлого грунта за счет ледяных включений, прослоев и линз W_i ;
- влажность мерзлого грунта за счет порового льда (льда-цемента) W_{ic} ;
- суммарная льдистость мерзлого грунта i_{tot} ;
- льдистость мерзлого грунта за счет включений льда i_i ;
- степень заполнения объема пор мерзлого грунта льдом и незамерзшей водой S_f ;
- плотность грунта;
- засоленность;
- заторфованность.

Перед проведением любых испытаний необходимо провести макроскопическое описание образцов, указав вид грунта, цвет, различные включения (крупнообломочного грунта, растительных остатков, ожелезнений, текстурные признаки (слоистость, пористость, трещиноватость) и т.д.) и криогенную текстуру. При этом криогенная текстура является одной из важнейших характеристик. Ведь в зависимости от нее будет выбран тот или иной способ определения характеристик физико-механических свойств грунтов.

Криогенная текстура – это совокупность признаков сложения мерзлого грунта, обусловленная ориентировкой, относительным расположением и распределением различных по форме и размерам ледяных включений и льда-цемента.

Лед в мерзлом грунте подразделяют на:

- поровой лед (лед-цемент), который находится в порах мерзлого грунта и цементирует его частицы или их агрегаты;
- ледяные включения – прослойки, линзы и другие формы льда; в зависимости от толщины ледяные включения подразделяют на тонкие (менее 2 мм), средние (2–20 мм) и толстые (более 20 мм)
- прослойки и линзы льда толщиной более 0,3 м в зависимости от характера залегания называют пластом или жилой; эти образования рассматриваются как элементы сложения массива мерзлого грунта и в понятие «криогенная текстура» не входят.

По криогенной текстуре грунты подразделяют согласно табл. 1 [2].

Таблица 1

Разновидности криогенной текстуры грунтов

Вид грунтов	Криогенная текстура
Скальные и полускальные	Трещинная, пластовая, полостная, жильная, массивная
Крупнообломочные	Массивная, порфирированная, корковая, базальная
Песчаные	Массивная, слоистая, порфирированная, сетчатая, базальная
Глинистые	Массивная, сетчатая, слоистая, атакситовая, порфирированная, линзовидная
Заторфованные	Порфирированная, слоистая, сетчатая, атакситовая, линзовидная

Рассмотрим эти текстуры по отдельности:

- массивная криогенная текстура характеризуется равномерным распределением порового льда, а льдистость за счет ледяных включений не превышает 3% общего объема мерзлого грунта;
- слоистая криогенная текстура характеризуется наличием ледяных включений в виде прослоек и линз; ледяные включения могут быть расположены горизонтально, косо, вертикально и распределены равномерно или неравномерно;
- сетчатая криогенная текстура характеризуется расположением ледяных включений в виде сетки; ледяная сетка может быть правильной, завершенной или неправильной, незавершенной и т.п.

При описании криогенной текстуры необходимо приводить данные об ориентировке шлиров, размерах ледяных включений и расстояниях между ними (табл. 2).

В природных условиях часто встречаются переходные разновидности криогенных текстур: прерывисто- и неполнослоистая, слоисто-сетчатая, беспорядочно- и неполносетчатая и т.д. (рис. 1). Иногда криогенную текстуру лишь условно можно отнести к определенному типу. Нередко можно наблюдать сложное строение мерзлого массива вследствие наложения и чередования двух или более криогенных текстур; в этих случаях следует выделять криогенные текстуры различного порядка, образованные ледяными включениями, которые отличаются друг от друга размерами и интервалом между ними.

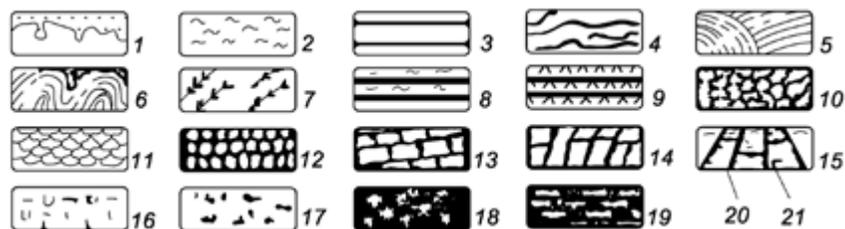


Рис. 1. Криогенные текстуры вечномёрзлых грунтов: 1 – массивная; 2 – линзовидная; 3 – полосчатая; 4 – волнистая; 5 – косая; 6 – плитчатая; 7 – прожилковая; 8 – поясковая; 9 – сложнослоистая; 10 – ячеистая; 11 – плетенчатая; 12 – чешуйчатая; 13 – плитчатая; 14 – блоковая; 15 – сложносетчатая; 16 – корковая; 17 – порфирированная; 18 – базальная; 19 – атакситовая; 20 – скелет мерзлого грунта; 21 – лед [3]

Таблица 2

Классификация шлировых криогенных текстур [4]

Тип (по расположению шлиров и характеру ледяного цемента)	Подтип (по ориентировке шлиров льда)	Вид (по интервалу между шлирами: редкослоистый и крупносетчатый – более 100 мм; среднеслоистый и среднесетчатый – 10–100 мм; частослоистый и мелкосетчатый – 1–10 мм; микрослоистый и микросетчатый – менее 1 мм)	Разновидность (по толщине ледяных шлиров: толстошлировая – более 10 мм; среднешлировая – 5–10 мм; тонкошлировая – 1–5 мм; микрошлировая – менее 1 мм)
Слоистый	Горизонтально-, косо-, вертикально-слоистый	Редко-, средне-, часто-, микрослоистый	Толсто-, средне-, тонко-, микрошлировая
Сетчато-слоистый		Средне-, часто-, микро-, сетчатослоистый	
Сетчатый	Горизонтально-, косо-, вертикально-сетчатый, беспорядочно-сетчатый	Крупно-, средне-, мелко-, микросетчатый	
Ячеистый	–	Крупно-, средне-, мелкоячеистый	
Атакситовый	–	–	–

Суммарной влажностью w_{tot} называется отношение массы всех видов воды в мерзлом грунте к массе скелета грунта, определяется в соответствии с ГОСТ 5180–84 [5]. Состоит из *влажности мерзлого грунта за счет ледяных включений, прослоев и линз* w_i и *влажности мерзлых минеральных прослоев* w_m , которая в свою очередь складывается из *влажности мерзлого грунта за счет порового льда (льда-цемента)* w_{ic} , и *влажности за счет незамерзшей воды* w_w :

$$w_{tot} = w_i + w_m = w_i + (w_{ic} + w_w) \quad (1)$$

Обычно все входящие в выражение параметры влажности должны определяться в ходе полевых и лабораторных работ опытным путем. При затруднениях, связанных с определением, строительными нормами и правилами, допускается вычисление части показателей.

Влажность мерзлого грунта между включениями льда определяется также в соответствии с ГОСТ 5180–84, в случае если w_m нельзя определить опытным путем, то для глинистых грунтов принимается

$$w_m \approx w_p + 0,03 \quad (2)$$

где w_p – влажность, соответствующая нижнему пределу пластичности (влажность на границе раскатывания), доли единицы.

Влажность мерзлого грунта за счет незамерзшей воды, w_w , определяется опытным путем (рассмотрено более подробно в главе 3.3). Для мерзлых незасоленных грунтов допускается определять по формуле:

$$w_w = k_w w_p \quad (3)$$

где k_w – коэффициент, принимаемый по табл. 3.1.3 в зависимости от температуры грунта $T, ^\circ\text{C}$ и числа пластичности I_p :

$$I_p = w_l - w_p, \quad (4)$$

где w_l – влажность грунта, соответствующая верхнему пределу пластичности (влажность на границе текучести).

Таблица 3

Коэффициенты k_w

Грунты	Число пластичности I_p , доля единицы	Коэффициент k_w при температуре грунта $T, ^\circ\text{C}$								
		-0,3	-0,5	-1	-2	-3	-4	-6	-8	-10
Пески и супеси	$I_p \leq 0,02$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Супеси	$0,02 < I_p \leq 0,07$	0,6	0,50	0,40	0,35	0,33	0,30	0,28	0,26	0,25
Суглинки	$0,07 < I_p \leq 0,13$	0,7	0,65	0,60	0,50	0,48	0,45	0,43	0,41	0,40
Суглинки	$0,13 < I_p \leq 0,17$	*	0,75	0,65	0,55	0,53	0,50	0,48	0,46	0,45
Глины	$I_p > 0,17$	*	0,95	0,90	0,65	0,63	0,60	0,58	0,56	0,55

Примечание. В таблице знак "*" означает, что вся вода в порах незамерзшая.

Влажность мерзлого грунта за счет порового льда (льда-цементы), w_{ic} , обычно вычисляется по зависимости:

$$w_{ic} = w_m - w_w \quad (5)$$

Влажность мерзлого грунта за счет ледяных включений, w_i :

$$w_i = w_{tot} - w_m \quad (6)$$

Величина суммарной влажности мерзлых грунтов изменяется в широких пределах и может намного превышать их полную влагоемкость в талом состоянии. Например, влажность мелкозернистых пылеватых песков с включением органического вещества может достигать 60 %, заторфованных суглинков – 150–200 %, а торфа – 400–800 % и более. Неоднородность криогенного строения мерзлых пород по вертикальному профилю, неоднородность их механического состава предопределяют необходимость обязательного послойного определения влажности и льдистости с предварительным подразделением на неоднородные по составу и криогенной текстуре слои в каждом генетическом горизонте отложений.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Выбор методики определения влажности при изучении мерзлых грунтов в полевых и лабораторных условиях обуславливается составом грунтов и их криогенной текстурой. Существуют различные методы определения влажно-

сти, которые в первом приближении могут быть подразделены на экспериментальные и расчетные. Среди экспериментальных методов наиболее широкое применение получили весовые (или прямые) методы, включающие непосредственное нахождение величины влажности мерзлого образца, извлеченного с определенной глубины, взвешиванием этого образца до и после удаления из него влаги.

В последнее время для оценки влажности мерзлых грунтов используются также радиоизотопные методы, в частности нейтрон-нейтронный. Этот метод наиболее перспективен, поскольку позволяет определить влажность мерзлого грунта не только в момент измерения, но и проследить за изменением ее во времени. Однако применительно к мерзлым грунтам со шлировыми криогенными текстурами радиоизотопные методы находятся в стадии разработки. В расчетных методах для определения влажности мерзлых грунтов используются различные показатели.

В зависимости от состава и криогенной текстуры мерзлого грунта применяются следующие методы определения суммарной влажности мерзлых грунтов: для тонкодисперсных и песчаных грунтов – точечный, метод бороздки, средней пробы и расчетный; для крупнообломочных пород – весовой и метод Ведерникова; для грунтов различного состава – совмещенный метод, предложенный Г.П. Мазуровым [6].

Точечный метод применяется для определения суммарной влажности мерзлых глин, суглинков, супесей, песков, характеризующихся массивной криогенной текстурой, и для определения влажности минеральных прослоек (или минеральных агрегатов) w_m , заключенных между ледяными слоями или ограниченными перемычками льда. Точечный метод включает определение влажности в некоторой «точке» слоя грунта. Имеется в виду некоторый малый объем грунта, не превышающий нескольких сантиметров в любом направлении. Пробы грунта с массивной криогенной текстурой отбираются по глубине через определенные интервалы и помещаются в тарированные металлические бюксы. Пробу грунта высушивают до постоянной массы. Взвешивание производят с точностью до 0,01 г. После отбора пробы грунта бюкс обматывается изолентой, которую снимают при его взвешивании. Взвешивать необходимо в тот же день, когда производится отбор пробы грунта. Минимальная навеска для определения суммарной влажности тонкодисперсных или песчаных грунтов должна быть не менее 30 г. Количество проб и частота их отбора по глубине разреза определяются задачами исследования. Обычно в однородных по составу грунтах с массивной криогенной текстурой с каждого метра разреза отбираются 3–4 пробы грунта. При содержании в грунтах органических остатков менее 10 % от массы сухого грунта допускается ускоренное высушивание мерзлого грунта при температуре 200–250 градусов (первичное – в течение 1 ч, повторное – 30 мин) [6].

Метод бороздки применяется для тонкодисперсных грунтов с тонкослоистой или мелкосетчатой криогенными текстурами, где толщина включений льда не превышает 0,5 см, а расстояние между ними не более 1 см. На стенке выработки или по высоте образца прочерчиваются две параллельные линии. Из ограниченной линиями «бороздки» грунт тонким и ровным по толщине слоем соскабливается в бюксы. Отбор проб методом бороздки проводят непрерыв-

но по всему массиву грунта. Каждая проба характеризует собой среднюю влажность слоя грунта (мощностью 10–15 см) с однотипной криогенной текстурой. Определение производят с трехкратной повторностью [6].

Метод средней пробы применяется для сильно льдонасыщенных грунтов с различными типами криогенных текстур, где толщина прослоек льда может изменяться в широких пределах. Пробы грунта массой от 0,2 до 2,0 кг и более помещают в полиэтиленовые мешки. При этом необходимо, чтобы грунт из массива отбирался ровным по толщине слоем. После отбора пробы грунт переносят в тарированную чашку, оттаявший грунт перемешивают металлическим шпателем и доводят до состояния однородной массы с влажностью, близкой к границе текучести, добавляя к образцу дистиллированную воду или сливая избыток воды, исключая потерю грунта. Из грунтовой смеси отбирают в бюксы три параллельные пробы массой не менее 50 г для определения влажности средней пробы грунтовой массы

Для определения влажности крупнообломочных отложений применяются два метода: *весовой* и *метод Ведерникова*.

Весовой метод. Влажность крупнообломочных пород устанавливается высушиванием образцов массой не менее 3 кг до постоянной массы при температуре 100–105 °С. Высушивание производится на металлических противнях. Перед высушиванием и после образец взвешивают на чашечных весах с точностью до 1 г. В некоторых случаях важно установить не только общую суммарную влажность крупнообломочных пород, но отдельно и влажность крупнообломочных частиц и влажность заполнителя. Влажность крупнообломочной части грунта (частиц размером более 2 мм) принимают равной величине их водоудерживающей способности, которую определяют следующим образом. Образец грунта после его высушивания на противнях рассеивают на ситах известной массы с отверстиями диаметром 2 мм. Сито с крупными частицами взвешивают на чашечных весах с точностью до 1 г и помещают в сосуд с водой на 1 ч. Дав стечь избытку воды, сито вновь взвешивают и рассчитывают влажность.

Метод Ведерникова. Этим методом определяют суммарную влажность гравийно-галечниковых или крупнообломочных отложений, сцементированных льдом. Глыбу мерзлого грунта массой не менее 2–3 кг взвешивают и опускают в сосуд с водой и полностью оттаивают. Затем перемешивают грунт для удаления пузырьков воздуха и доливают водой до тех пор, пока ее излишек не перельется через водослив, после чего сосуд с водой и грунтом взвешивают. Зная массу сосуда, наполненного водой, рассчитывают суммарную влажность грунта. Использован принцип пикнометрического способа определения суммарной влажности, что освобождает от необходимости высушивания грунта. Объем грунта определяется по объему вытесненной им воды, льдистость — по изменению объема системы скелет–вода после оттаивания в грунте льда. Прибор для выполнения опыта представляет собой сосуд объемом от 3 до 10 л и более со сливным устройством (шланг с зажимом), установленный на чашечные или автоматические весы. Весы устанавливают на горизонтальную плоскость, на чашку весов помещают сосуд при закрытом зажиме на сливном шланге. В сосуд наливают воду выше сливного отверстия, избыток воды сливают через

шланг, затем зажим закрывают и определяют массу сосуда с водой. Все последующие операции проводят с зафиксированным положением сосуда. В сосуд с водой при закрытом зажиме помещают образец мерзлого грунта массой более 1 кг и взвешивают, получают массу сосуда с водой и грунтом-монолитом. После взвешивания открывают зажим, сливая избыток воды выше сливного устройства, затем закрывают зажим, а сосуд с водой и грунтом снова взвешивают и получают массу сосуда с грунтом-монолитом после слива воды. После оттаивания мерзлого грунта в сосуде с водой и его размочения уровень воды в сосуде опустится ниже сливного отверстия, поэтому следует долить воды несколько выше сливного отверстия, избыток ее слить через шланг, а сосуд с водой и размоченным грунтом взвесить. Получают массу сосуда с водой и размоченным грунтом. Для ускорения оттаивания образец можно разбить ножом. Затем проводится расчет физических характеристик.

Расчетный метод определения суммарной влажности применяется для грунтов со слоистой и сетчатой криогенными текстурами, когда включения льда имеют четкие прямолинейные границы, толщина их превышает 2 мм, а расстояние между соседними включениями составляет более 10 мм. При изучении криотекстуры мерзлого грунта в стенках выработок или естественных обнажениях измеряют толщину включений льда в определенном интервале глубин или в горизонте. Для грунта слоистой криогенной текстуры суммарную толщину включений льда подсчитывают по глубине разреза, для грунта сетчатой криогенной текстуры — по глубине и по простиранию. Измерения производят с трехкратной повторностью, а за величину суммарной толщины включений льда принимают среднее арифметическое значение результатов параллельных измерений. Суммарная толщина включений льда, приходящаяся на единицу глубины разреза (в случае слоистой криогенной текстуры), или суммарная площадь ледяных включений на единицу площади разреза (для сетчатой криогенной текстуры) даст величину объемной льдистости мерзлого грунта за счет ледяных включений. Суммарную влажность слоев мерзлого грунта, расположенных между измеренными включениями льда, определяют в зависимости от их криогенной текстуры точечным методом или методом бороздки. При мощности слоев 0,5 м и более влажность определяют для каждого из них, при меньшей мощности, в случае постоянства их криогенной текстуры, — через каждые 0,5 м по глубине, а при изменении криогенной текстуры слоев в разрезе — для каждого слоя. В последующих расчетах используют среднее значение суммарной влажности слоев.

При определении влажности мерзлого грунта крупноредкосетчатой криогенной текстуры по кернам расчетный способ дает лишь приближенное значение суммарной влажности, как правило, заниженное, так как при этом невозможно учесть крупные вертикальные включения льда.

Графическое выражение влажности осуществляется путем построения профиля влажности по глубине разреза, где на одной оси координат откладывается среднее значение влажности для каждого слоя определенной мощности, а на другой — глубина отбора пробы. Используется также **метод построения хроноизоплет влажности**, который позволяет охарактеризовать особенности изменения влажности в грунтовой массе любой мощности за определенный промежуток времени. Метод заключается в том, что в обычной сетке прямоугольных координат по оси абсцисс откладывают даты, а по оси ординат — глубину от поверхности.

Для каждого срока наблюдений на соответствующей ему ординате выписывают величину влажности грунта. Затем на этих ординатах путем интерполяции обыскиваются точки, отвечающие величинам влажности с выбранным интервалом значений. Точки с одинаковыми влажностями соединяют линиями, которые и являются линиями с одинаковой во времени влажностью [6].

Экспериментально льдистость определяется на основе **совмещенного метода Г.П. Мазурова** или непосредственным измерением суммарной толщины включений льда, приходящихся на единицу разреза. Для этого к мерзлому монолиту прикладывают масштабную линейку и непрерывно по всей высоте монолита грунта измеряют суммарную толщину прослоек льда, секущих поперечную линию. Средний показатель льдистости мерзлого грунта за счет включений льда вычисляется на основе измерения суммарного содержания прослоек льда по трем линиям.

В настоящее время льдистость определяется расчетным методом по формулам, но для мерзлых песчаных и тонкодисперсных грунтов с различными типами криогенных текстур Г.П. Мазуровым разработан метод совмещенного определения основных физических характеристик мерзлых грунтов. Он позволяет на одном образце мерзлого грунта определять плотность, суммарную влажность и суммарную льдистость, а на образце талого связного медленно размокающего грунта – плотность и естественную влажность. Метод совмещенного определения плотности, влажности и льдистости разработан Г.П. Мазуровым на кафедре грунтоведения Ленинградского университета. В данном методе сочетается высокая точность и хорошая согласованность между определяемыми характеристиками, с одной стороны, и простота эксперимента, с другой.

В совмещенном методе использован принцип пикнометрического способа определения суммарной влажности, что освобождает от необходимости высушивания грунта: объем грунта устанавливается по объему вытесненной им воды, а льдистость – по изменению объема системы «скелет + вода» после оттаивания в грунте льда. Определение основных физических характеристик должно выполняться на одном и том же объеме образца грунта.

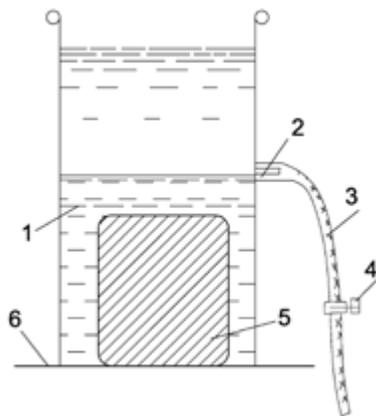


Рис. 2. Схема прибора: 1 – сосуд, 2 – штуцер, 3 – сливной шланг, 4 – зажим, 5 – грунт, 6 – чашка (площадка) весов

Преимущество метода заключается в том, что основные физические свойства мерзлых грунтов могут быть определены в лабораторных и полевых условиях, непосредственно на месте изысканий.

Совмещенный метод разработан для определения основных физических характеристик мерзлых грунтов (кроме сыпучемерзлых).

Применяемый прибор для выполнения опыта (рис. 2) представляет собой сосуд объемом от 3 до 10 л и более, снабженный сливным устройством (шлангом с зажимом). Для опыта также необходимы весы чашечные или автоматические (циферблатные) до 5–10 кг.

Весы устанавливают на горизонтальную плоскость (стол, помост). На чашку (площадку) весов помещают сосуд при закрытом зажиме на сливном шланге. В сосуд наливают воду выше сливного отверстия, избыток воды сливается через шланг, затем зажим закрывают, и сосуд с водой взвешивают, определяют массу (вес) сосуда с водой m_0 .

Все последующие операции: долив и слив воды, погружение грунта в сосуд и взвешивание грунта с водой производят, не сдвигая и не снимая сосуда с весов до конца опыта.

В сосуд с водой при закрытом зажиме помещают образец (глыбу, часть керна или несколько кусков) мерзлого или талого медленно размокаемого грунта массой более 1 кг и быстро взвешивают. Получают массу сосуда с водой и грунтом-монолитом m_f^I .

Сразу же после взвешивания открывают зажим, сливается избыток воды выше сливного отверстия, зажим закрывают, а сосуд с водой и грунтом снова взвешивают. Получают массу сосуда с грунтом-монолитом после слива воды m_f^{II} .

Грунт в сосуде с водой оттаивает; для ускорения оттаивания образец грунта рекомендуется раздробить с помощью металлического стержня или ножа. После оттаивания и размокания грунта уровень воды в сосуде опустится ниже сливного отверстия, поэтому следует долить воды несколько выше сливного отверстия, избыток её слить через шланг, а сосуд с водой и размокшим грунтом взвесить. Получим массу сосуда с водой и размокшим грунтом m_f^I .

Расчет физических характеристик мерзлых грунтов выполняется следующим образом:

1. Масса монолита мерзлого грунта (m_f , г):

$$m_f = m_f^I - m_0. \quad (7)$$

2. Объем монолита мерзлого грунта (V_f , см³):

$$V_f = \frac{m_f^I - m_f^{II}}{\rho_w}, \quad (8)$$

где ρ_w – плотность воды, принимаемая равной 1 г/см³.

3. Плотность мерзлого грунта (ρ_f , г/см³) – масса монолита мерзлого грунта в единице его объема:

$$\rho_f = \frac{m_f}{V_f}, \quad (9)$$

или

$$\rho_f = \frac{(m_f^I - m_0) \cdot \rho_w}{m_f^I - m_f^{II}}. \quad (10)$$

4. Масса скелета грунта (m_s , г):

$$m_s = \frac{(m_{th}^{II} - m_0) \cdot \rho_s}{\rho_s - \rho_w} = \frac{(m_{th}^{II} - m_0) \cdot \rho_s}{\rho_s - 1}, \quad (11)$$

где ρ_s — плотность минеральных частиц грунта, г/см³.5. Плотность скелета мёрзлого грунта ($\rho_{d,f}$, г/см³) — масса сухого (скелета) грунта в единице объёма мёрзлого грунта:

$$\rho_{d,f} = \frac{m_s}{V_f}, \quad (12)$$

или

$$\rho_{d,f} = \frac{\rho_f}{1 + W_{tot}}. \quad (13)$$

6. Плотность скелета талого грунта ($\rho_{d,th}$, г/см³):

$$\rho_{d,th} = \frac{m_s}{m_{th}^{II} - m_0}. \quad (14)$$

7. Суммарная влажность (W_{tot} , д.е.) — отношение массы воды к массе скелета грунта:

$$W_{tot} = \frac{\rho_f}{\rho_{d,f}} - 1 = \frac{\rho_f \cdot V_f}{m_s} - 1, \quad (15)$$

или

$$W_{tot} = \frac{(m_f^I - m_0) \cdot (\rho_s - 1) \cdot \rho_w}{(m_{th}^{II} - m_0) \cdot \rho_s} - 1. \quad (16)$$

8. Объём льда в монолите грунта (V_i , см³):

$$V_i = \frac{(m_{th}^{II} - m_f^{II})}{\rho_w - \rho_i}, \quad (17)$$

где ρ_i — плотность льда, принимаемая равной 0,92 г/см³, или

$$V_i = 12,5 \cdot (m_{th}^{II} - m_f^{II}). \quad (18)$$

9. Масса льда в монолите грунта (m_i , г):

$$m_i = V_i \cdot \rho_i, \quad (19)$$

или

$$m_i = 11,5 \cdot (m_{th}^{II} - m_f^{II}). \quad (20)$$

10. Льдистость объёмная (i_v , д.е.) — отношение объёма льда к объёму монолита мёрзлого грунта:

$$i_{tot} = \frac{V_i}{V_f}, \quad (21)$$

или

$$i_{tot} = \frac{12,5 \cdot (m_{th}^{II} - m_f^{II}) \cdot \rho_w}{m_f^I - m_f^{II}}. \quad (22)$$

11. Льдистость весовая (i_w , д.е.) — отношение массы льда к массе скелета грунта:

$$i = \frac{m_i}{m_s}, \quad (23)$$

или

$$i = \frac{11,5 \cdot (m_{th}^{II} - m_f^{II}) \cdot (\rho_s - 1)}{(m_{th}^{II} - m_0) \cdot \rho_s}. \quad (24)$$

12. Льдистость относительная (i_r , д.е.) — отношение льдистости весовой к суммарной влажности:

$$i_r = \frac{i_w}{W_{tot}}, \quad (25)$$

или

$$i_r = \frac{11,5 \cdot (m_{th}^{II} - m_f^{II}) \cdot (\rho_s - 1)}{(m_{th}^{II} - m_0) \cdot \rho_s \cdot W_{tot}}. \quad (26)$$

13. Влажность мёрзлого грунта за счёт незамёрзшей воды или содержание незамёрзшей воды (W_w , д.е.):

$$W_w = W_{tot} - i_w. \quad (27)$$

Изложенный метод определения физических характеристик мерзлых грунтов до сих пор не нашел достаточно широкого применения в практике из-за его трудоемкости. Поэтому вычисление льдистости выполняется по следующим формулам.

Весовая льдистость – i , д. е., отношение веса воды к весу всего грунта, определяется по формуле:

$$i = \frac{w_{tot} - w_w}{1 + w_{tot}} \quad (28)$$

w_{tot} – суммарная влажность мерзлого грунта, д. е.;

w_w – влажность мерзлого грунта за счет содержащейся в нем при данной отрицательной температуре незамерзшей воды, д. е.

Суммарная льдистость мерзлого грунта i_{tot} , д. е., – отношение объема содержащегося в нем льда к объему мерзлого грунта, определяется по формуле:

$$i_{tot} = \frac{\rho \cdot i}{\rho_i} = \frac{\rho(w_{tot} - w_w)}{\rho_i(1 + w_{tot})} \quad (29)$$

где ρ_i – плотность льда, принимаемая равной $0,9 \text{ г/см}^3$; ρ – плотность мерзлого грунта, г/см^3 , i – весовая льдистость, д. е.

Формула применима для мерзлых грунтов с различными видами криогенных текстур, где толщина включений льда не превышает $0,5 \text{ см}$.

Льдистость грунта за счет видимых ледяных включений i_i , д. е., – отношение содержащегося в нем объема видимых ледяных включений к объему мерзлого грунта. Определяется по формуле [2]:

$$i_i = \frac{\rho_s(w_{tot} - w_m)}{\rho_i + \rho_s(w_{tot} - w_w)} \quad (30)$$

где ρ_s – плотность частиц грунта, г/см^3 ; ρ_i – плотность льда, принимаемая равной $0,9 \text{ г/см}^3$; w_{tot} – суммарная влажность мерзлого грунта, д. е.; w_m – влажность мерзлого грунта, расположенного между ледяными включениями, д. е.; w_w – влажность мерзлого грунта за счет содержащейся в нем при данной отрицательной температуре незамерзшей воды, д. е.

Льдистость грунта за счет порового льда-цемента i_{ic} , д. е., определяется также из разности:

$$i_{ic} = i_{tot} - i_i \quad (31)$$

По льдистости скальные, полускальные и дисперсные грунты подразделяют согласно табл. 4–6.

Таблица 4

Классификация скальных и полускальных грунтов по льдистости за счет видимых ледяных включений

Разновидность скальных и полускальных грунтов	Льдистость за счет видимых ледяных включений i_i , д. е.
Слабольшедистый	$i_i \leq 0,01$
Льдистый	$0,01 < i_i \leq 0,05$
Сильнольдистый	$i_i > 0,05$

Таблица 5

Классификация дисперсных грунтов по льдистости за счет видимых ледяных включений

Разновидность дисперсных грунтов	Льдистость за счет видимых ледяных включений i_i , д. е.
Нельдистый	$i_i \leq 0,03$
Слабольшедистый	$0,03 < i_i \leq 0,20$
Льдистый	$0,20 < i_i \leq 0,40$
Сильнольдистый	$0,40 < i_i \leq 0,60$
Очень сильнольдистый	$0,60 < i_i \leq 0,90$

Таблица 6

Классификация песчаных грунтов по суммарной льдистости

Разновидность дисперсных грунтов	Льдистость за счет видимых ледяных включений i_{tot} , д. е.
Слабольшедистый	$i_{tot} \leq 0,40$
Льдистый	$0,40 < i_{tot} \leq 0,60$
Сильнольдистый	$i_{tot} > 0,60$

Степень заполнения объема пор мерзлого грунта льдом и незамерзшей водой S_r , д. е., определяется по формуле:

$$S_r = \frac{(1,1w_{ic} + w_w)\rho_s}{e\rho_w} \quad (32)$$

где w_{ic} – влажность мерзлого грунта за счет порового льда, цементирующего минеральные частицы (лед-цемент), д. е.; w_w – влажность мерзлого грунта за счет содержащейся в нем при данной отрицательной температуре незамерзшей воды, д. е.; ρ_s – плотность частиц грунта, г/см^3 ; e – коэффициент пористости мерзлого грунта; ρ_w – плотность воды, принимаемая равной 1 г/см^3 .

Коэффициент пористости, e , д. е., определяется по формуле:

$$e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d} \quad (33)$$

где ρ_s – плотность частиц грунта, г/см^3 ; ρ_d – плотность мерзлого грунта в сухом состоянии (плотность скелета мерзлого грунта), г/см^3 , определяемая по формуле:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w_{tot}} \quad (34)$$

где ρ – плотность грунта, г/см^3 ; w_{tot} – суммарная влажность грунта, д. е.

Плотность и пористость являются основными физическими показателями мерзлой породы, используемыми при определении теплофизических и механических свойств, степени водонасыщения и льдистости грунтов. Величина плотности необходима при расчете коэффициента теплопроводности талых и протаявших грунтов, при характеристике сопротивления грунтов нормальному давлению, сцепления

мерзлого грунта, сопротивления мерзлого и оттаивающего грунта сдвигу и др. Пористость характеризует структуру, текстуру грунта и используется при расчетах степени льдонасыщения и коэффициента сжимаемости мерзлых грунтов.

Под плотностью мерзлого грунта понимают массу единицы его объема в ненарушенном сложении. Единицей измерения этого свойства в системе СИ является $\text{кг}/\text{м}^3$, в системе СГС — $\text{г}/\text{см}^3$. Плотность определяется на образцах ненарушенного сложения и при естественной влажности в единице объема грунта.

Пористость может быть выражена коэффициентом пористости, равным отношению объема пор к объему минерального скелета грунта. В соответствии с различными типами пористости выделяют суммарный коэффициент пористости мерзлых грунтов e , и коэффициент пористости минеральных агрегатов или минеральных прослоек e_r . В немерзлых грунтах коэффициент пористости, как правило, не превышает 2 д. е., в мерзлых грунтах он изменяется в широких пределах и в сильно льдонасыщенных грунтах может быть равен 3 и даже 5 д. е. С увеличением льдистости при постоянном значении e_r коэффициент общей пористости возрастает в 2,7–5,0 раз при увеличении льдистости от 5 до 50 %.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ПЛОТНОСТИ МЕРЗЛЫХ ПОРОД

В зависимости от типа криогенной текстуры для определений плотности мерзлого грунта применяются методы: 1 — режущих цилиндров (режущего кольца); 2 — обмера образцов правильной геометрической формы; 3 — взвешивания образцов в нейтральной жидкости; 4 — метод лунки; 5 — метод вытеснения нейтральной жидкости (метод Ведерникова); 6 — радиоизотопные и 7 — расчетные. При полевых исследованиях используются методы 1, 2, 4, 7, при работе в лабораторных и стационарных условиях — 3, 5, 6.

Различия между основными методами сводятся к способу определения объема образца: по объему вытесненной жидкости или непосредственно обмером образца заданной формы. Для практических целей минимальный объем образца мерзлого грунта с массивной текстурой при определении плотности целесообразно принимать не менее 27 см^3 . Применительно к слоистой и сетчатой текстурам мерзлых тонкодисперсных или песчаных грунтов, отличающихся неоднородностью распределения льда и минерального скелета грунта в объеме, пробы грунта должны быть на порядок больше размеров ледяных и минеральных прослоек.

Количество определений плотности мерзлого грунта по глубине мерзлой толщи обуславливается в первую очередь задачами исследования. Отбор пробы должен сопровождаться описанием криогенного строения грунта и характеристикой его состава и влажности. Взвешивание образца при определении общей плотности грунта производят с точностью до 0,01 г на технических и с точностью до 1 г на чашечных весах. Определение плотности мерзлого грунта проводится трехкратно. Расхождение результатов параллельных определений мерзлого грунта не должно превышать $0,05 \text{ г}/\text{см}^3$. За величину плотности грунта принимают среднее арифметическое значение результатов параллельных определений. Конечный результат выражают с точностью до $0,01 \text{ г}/\text{см}^3$.

Для песчаных и тонкодисперсных грунтов с массивной криогенной текстурой применимы все методы.

Метод режущего кольца используется для определения плотности минеральных агрегатов грунтов с крупносетчатой или крупнослоистой криогенной текстурой, где размер минеральных агрегатов или минеральных прослоек составляет не менее 4,0 см, а также для определения плотности мерзлых грунтов с массивной криогенной текстурой. Методика определения сводится к отбору монолита грунта в стальное режущее кольцо объемом 50–100 см^3 . После отбора грунта в кольцо оно взвешивается. Зная объем мерзлого грунта и его массу, устанавливают плотность мерзлого грунта. Зная массу грунта после его высушивания, вычисляют плотность скелета грунта.

Метод обмера образцов правильной геометрической формы применяется для определения плотности грунтов с различными типами и видами криогенных текстур. При отборе монолита ему придают определенную форму, позволяющую установить объем грунта в ненарушенном сложении. Отобранная проба грунта взвешивается и устанавливается общая плотность грунта, а после его высушивания до постоянного веса — плотность скелета грунта. Обычно при определении плотности мерзлого грунта монолитам придают форму куба или параллелепипеда. Для определения приближенного значения плотности по монолитам (объемом не менее 50 см^3), извлеченным из буровых скважин, измеряется их диаметр, высота (с точностью до 0,01 см) и масса. Этот же метод применяется для определения плотности скелета грунтов с массивной, крупнослоистой и крупносетчатой криогенными текстурами.

Метод взвешивания образца в нейтральной жидкости применяется для определения плотности мерзлых тонкодисперсных грунтов с тонкослоистой, мелкосетчатой криогенными текстурами при толщине минеральных прослоек не более 0,5 см. Взвешивают образец в сосуде емкостью 1000 см^3 , на две трети заполненном нейтральной жидкостью. В процессе работы измеряется температура жидкости и ее плотность, с коромысла технических весов снимают левую дужку с чашкой и уравнивают весы мешочком с дробью, подвешенным на крючок левой дужки. Пробу мерзлого грунта объемом не менее 50 см^3 перевязывают капроновой ниткой, подвешивают к левой серьге весов и взвешивают. На подставку весов с левой стороны помещают сосуд с нейтральной жидкостью, пробу мерзлого грунта погружают в жидкость на глубину не менее 5–7 см и вновь взвешивают. Проба мерзлого грунта при взвешивании не должна соприкасаться с дном и стенками сосуда. После взвешивания мерзлого монолита в воздухе и затем в нейтральной жидкости определяют общую плотность мерзлого грунта. Точность измерения плотности этим методом составляет $0,02 \text{ г}/\text{см}^3$.

Нейтральная жидкость, используемая для определения объема грунта, должна иметь температуру замерзания ниже температуры замерзания этого грунта, не реагировать с грунтом и не растворять лед. Обычно в качестве нейтральной жидкости применяются керосин, глицерин, толуол и лифоин. Плотность этих жидкостей устанавливается ареометром или определяется следующим образом.

В стеклянную колбу объемом 50 см^3 насыпают дробь в таком количестве, чтобы колба тонула в воде. Затем колба взвешивается в воздухе и в дистиллированной воде. Объем колбы равен разности весов колбы в воздухе и в воде, деленной на плотность воды. Таким образом, если известны объем колбы, ее вес в воздухе и нейтральной жидкости, то плотность нейтральной жидкости (при данной температуре) равна разности масс колбы в воздухе и жидкости, деленной на объем

колбы. Нередко для определения плотности методом гидростатического взвешивания образец мерзлого грунта предварительно покрывают парафиновой оболочкой, а его взвешивание проводят не в нейтральной жидкости, а в воде. Предварительно образец грунта зачищают ножом для удаления острых выступающих граней и взвешивают с точностью до 0,01 г в помещении с отрицательной температурой. После взвешивания образец несколько раз погружается в парафин. Остающиеся под парафиновой оболочкой пузырьки воздуха удаляются нагретой иглой. Определив массу запарафинированного образца в воздухе и воде, устанавливают объем парафина, объем и плотность грунта. Зная общую плотность мерзлого грунта, рассчитывают плотность скелета грунта.

Метод «лунки» применяют для определения общей плотности мерзлых дисперсных пород с массивной и шлировой криогенными текстурами. Этим же методом устанавливается плотность крупнообломочных пород.

Метод используется при работе в открытых горных выработках. Дно выработки выравнивают и зачищают. В дне шурфа делают углубление — лунку — размером не менее 30 x 30 x 30 см. Весь грунт, выбранный из лунки, собирают и взвешивают на чашечных весах с точностью до 1,0 г. После отбора грунта дно лунки выстилается синтетической пленкой (рис. 3.1, в). Затем лунку заполняют водой или засыпают сухим песком с размером зерен от 0,5 до 3,0 мм. Мерный песок должен быть не только однородным, но и чистым. Измеряют объем песка или объем воды, необходимый для заполнения лунки, и таким образом устанавливают объем грунта, извлеченного из лунки. Определив массу грунта и его объем, вычисляют общую плотность мерзлого грунта.

Метод вытеснения нейтральной жидкости (метод Ведерникова) применяется для определения плотности мерзлого грунта при работе в полевых условиях. Для определения необходима емкость со сливным устройством. КERN мерзлого грунта из скважины или монолит мерзлого грунта произвольной формы, отобранный из стенки выработки, взвешивают и обвязывают капроновой ниткой. Затем монолит быстро опускают в емкость и замеряют объем вытесненной жидкости, предварительно охлажденной до 0°С. Определив массу грунта и объем вытесненной жидкости, рассчитывают общую плотность мерзлого грунта.

Этот же метод используется для определения объема небольших монолитов мерзлого грунта в лабораторных условиях. Перед тем как погрузить грунт в емкость со сливным устройством, его взвешивают, затем парафинируют и вновь взвешивают. Определив массу грунта без парафина и массу грунта в парафиновой оболочке, вычисляют массу парафина. Зная, что плотность чистого парафина равна 0,9 г/см³, устанавливают его объем и объем мерзлого грунта, а затем рассчитывают общую плотность.

Радиоизотопные методы применяются в основном для измерения плотности мерзлых грунтов в условиях естественного залегания. Существует два метода измерения плотности с использованием гамма-излучения: 1 — гаммаскопический метод; 2 — метод рассеянного гамма-излучения. В качестве источников гамма-излучения используются главным образом изотопы цезий-137 и кобальт-60. Гаммаскопический метод основан на ослаблении интенсивности пучка гамма-квантов в зависимости от плотности вещества, через которое проходит пучок. На практике используются три варианта гаммаскопического

метода: а — источник и детектор гамма-излучения размещаются в параллельных скважинах в грунте; б — детектор излучения находится на поверхности, а источник — в грунте; в — источник и детектор излучения находятся по обе стороны от исследуемого объекта (образца, монолита и т. п.). Измерения могут выполняться в геометрии узкого или широкого пучка.

В геометрии узкого пучка регистрируются только те гамма-кванты, которые не взаимодействовали со средой, т. е. не теряли своей энергии при прохождении их от источника до детектора. Это достигается за счет применения свинцовых или вольфрамовых экранов-коллиматоров или соответствующим подбором параметров электронной схемы. Геометрия узкого пучка используется в вариантах а и в в тех случаях, когда требуется тщательная дифференциация получения характеристик криогенного строения мерзлой толщи. Этот метод позволяет практически выделять, например, прослойки льда мощностью не менее 0,5—1,0 см.

В геометрии широкого пучка регистрируют не только первичные гамма-кванты, но и вторичные, пришедшие к детектору после одного или нескольких взаимодействий со средой. Достоинством геометрии широкого пучка является сравнительная простота и портативность измерительной аппаратуры. Однако в данном случае получают значения плотности, усредненные по значительно большему объему грунта, чем в геометрии узкого пучка, что затрудняет характеристику криогенного строения.

При использовании гаммаскопического метода в полевых условиях целесообразно использовать градуировочный график, полученный на основе измерений в грунтах с известной плотностью. Для этого необходимо не менее 5 значений, перекрывающих весь необходимый диапазон. Гаммаскопический метод применим для измерения плотности грунтов до глубины 1,5—2,0 м.

Метод рассеянного гамма-излучения используется для измерений плотности грунтов в скважинах. Если в скважину поместить источник гамма-квантов и на некотором расстоянии от него детектор, то часть гамма-квантов, попадающих из скважины в грунт за счет рассеяния на электронах атомов грунта, будет возвращаться в скважину и регистрироваться детектором. Интенсивность регистрации рассеянных гамма-квантов зависит от плотности рассеивающей среды. Функциональная зависимость интенсивности регистрируемых гамма-квантов от плотности имеет сложный характер. Для измерения значений плотности грунтов в диапазоне 1,1—2,4 г/см³ в промышленных плотномерах используется нисходящая ветвь этой зависимости, т. е. показания приборов уменьшаются с увеличением плотности по экспоненциальному или близкому к линейному закону.

Применяя метод рассеянного гамма-излучения, рассматривают два вида эффективных радиусов регистрации: вертикальный и горизонтальный. Приблизительные значения вертикального радиуса соответствуют расстоянию между источником и детектором гамма-излучения, увеличенному на 4—6 см. Например, для влагоплотномера УР-70 вертикальный радиус составляет 40—50 см, а для плотномера РПР-36 — 25—28 см. Этими величинами и определяется разрешающая способность приборов по вертикали. Величина горизонтального радиуса зависит от многих факторов, однако можно сказать, что в среднем она не превышает 10 см при использовании источника цезий-137 и 15 см — для источника кобальт-60. В связи с этим можно заключить, что метод рассеянного гамма-излучения позволяет получать значения плотности, усредненные

(не обязательно линейно) по объему, составляющему более $0,2 \text{ м}^3$, причем вертикальное разрешение плотномеров не позволяет решать задачи, связанные с выделением маломощных слоев различного состава или строения.

Так как измерения плотности ведутся по некоторому объему, прилегающему к скважинному снаряду, показания плотномеров существенно зависят от наличия воздушных зазоров между обсадной трубой и стенкой скважины, конструкции самой скважины и технологии ее оборудования. Большое различие (более 8 мм) между внутренним диаметром обсадной трубы и диаметром зонда может приводить к изменениям показаний прибора, обусловленным переменным положением снаряда относительно оси скважины.

Влияние влажности на показания плотномеров связано с повышенной электронной плотностью воды. Считается, что каждые 10 % объема воды в грунте завышают измеренное значение плотности на $0,01 \text{ г/см}^3$, в связи с чем необходимо вносить поправки.

При исследовании литологического разреза по скважине основное значение имеет вертикальный радиус регистрации. Истинное значение плотности будет зарегистрировано в том случае, когда мощность однородного слоя превышает величину этого радиуса. При наличии прослоев меньшей мощности или при расположении плотномера на границе двух слоев результаты измерения искажаются в сторону завышения или занижения в зависимости от абсолютных значений плотности контактирующих слоев. Положение границ слоев при этом определяется приближенно по точкам перегиба графика распределения плотности вдоль скважины.

Для измерения плотности радиоизотопными методами отечественной промышленностью выпускались радиоизотопный влагоплотномер УР–70 и поверхностно-глубинный плотномер ППГР–1, предназначенные для скважинных измерений до глубины 30 м. Для измерения плотности верхнего слоя грунта до глубины 0,3 м используется плотномер типа ИОМР–2. Точность измерения плотности колеблется в пределах $\pm(0,02–0,04) \text{ г/см}^3$ в зависимости от типа прибора. Время измерения в одной точке не превышает 3 минут.

Расчетные методы для определения плотности мерзлого грунта основаны на эмпирических зависимостях, полученных разными авторами. Они рассчитываются на основе таких показателей, как суммарная влажность, влажность за счет незамерзшей воды, плотность частиц грунта.

По формуле А.М. Пчелинцева [7] плотность мерзлого грунта определяется из выражения:

$$\rho_f = \frac{\rho_s \rho_w \rho_i \cdot (1 + W_{tot})}{\rho_w \rho_i + \rho_s \cdot (W_{tot} \rho_w + W_w (\rho_i - \rho_w))}, \quad (35)$$

где ρ_s – плотность частиц грунта, г/см^3 ; ρ_w – плотность воды, г/см^3 ; ρ_i – плотность льда, г/см^3 ; W_{tot} – суммарная влажность, д. е.; W_w – количество незамерзшей воды, д. е.;

Эта формула применяется для определения плотности тонкодисперсных и песчаных пород с различными криогенными текстурами. При выводе этой формулы сделано допущение, что в мерзлом грунте отсутствует замещенный воздух. Точность данного расчетного метода составляет $0,02 \text{ г/см}^3$.

Вотьяковым И.Н. [8] предложена следующая формула для расчета плотности супесчано-суглинистых грунтов:

$$\rho = 2,41 (1 + W_c) / (\rho_s W_s + p_i), \quad (36)$$

а для песчаных грунтов

$$\rho = 2,33 (1 + W_c) / (\rho_s W_s + p_i). \quad (37)$$

Погрешность при расчете плотности по формулам 36–37 составляет не более 2 % при условии, что суммарная влажность превышает следующие значения: для гравийно-галечниковых грунтов 5%; песчаных – 15%; супесчано-суглинистых – 20%; глин – 25%. Верхний предел влажности не ограничен.

Засоленность определяется тремя способами – титрометрическим, по сухому остатку, и по электрическому сопротивлению раствора. Все эти методы имеют удовлетворительную и близкую друг другу точность, однако не лишены недостатков. Титрометрический метод (определение ионного состава водных вытяжек) трудоемок, может быть ошибки, связанные с недостаточным очищением вытяжек от коллоидов. Фильтрация вытяжек иногда занимает несколько дней, а при неудовлетворительном ее выполнении является причиной завышенных значений засоленности при использовании метода сухого остатка. Сухой остаток представляет собой продукт выпаривания водной вытяжки из почвы. Фактически он является суммой всех водорастворимых соединений почвы, как неорганических, так и органических. При условии, что химический состав вытяжки известен, удобным нужно признать метод электрических сопротивлений. Если стандартные растворы, с которыми осуществляется сравнение сопротивлений, приготовлены правильно, ошибка метода не превышает 0,02% засоленности.

В солемере (СК–50) применен метод замещения, являющийся разновидностью кондуктометрического метода. Его преимущество заключается в последовательном во времени сравнении измеряемой величины сопротивления и величины, воспроизводимой образцовой мерой. Так как обе эти величины включаются одна за другой в одну и ту же часть измерительной цепи прибора, то точность измерений значительно повышается. Необходимо только соблюдать условия постоянства температуры и равенство объема раствора при каждом определении, а также размещение измерительного электрода на одинаковых расстояниях от дна сосуда и его стенок.

Г.И. Дубиков [8] на примере исследований на Бованенковском ГКМ показал, что засоленность по данным водных вытяжек, как правило, выше на 10–30% за счет нарушения химического равновесия порового раствора при приготовлении вытяжки, однако это происходит, по-видимому, главным образом из-за перехода обменных катионов в раствор.

В настоящее время наиболее часто используемым является титрометрический метод, что связано с необходимостью определения типа засоления. Мерзлые грунты с континентальным типом засоления (сульфатный тип засоления) относят к засоленным при степени засоленности D_{sal} , % [2]:

- для песков $\geq 0,10$;
- для супесей $\geq 0,15$;
- для суглинков $\geq 0,20$;
- для глин $\geq 0,25$.

По степени засоленности D_{sal} , %, мерзлые грунты с морским типом засоления легорастворимыми солями (хлоридный тип засоления) подразделяют согласно табл. 7.

Таблица 7

Классификация мерзлых грунтов по степени засоленности

Разновидность грунтов	Суммарная льдистость D_{sal} , %		
	пески	супеси	суглинки и глины
Незасоление	$D_{sal} < 0,05$	$D_{sal} < 0,15$	$D_{sal} < 0,20$
Слабозасоленные	$0,05 \leq D_{sal} < 0,15$	$0,15 \leq D_{sal} < 0,35$	$0,20 \leq D_{sal} < 0,40$
Среднезасоленные	$0,15 \leq D_{sal} < 0,30$	$0,35 \leq D_{sal} < 0,60$	$0,40 \leq D_{sal} < 0,80$
Сильнозасоленные	$D_{sal} \geq 0,30$	$D_{sal} \geq 0,60$	$D_{sal} \geq 0,80$

Определение относительного содержания органического вещества I_r определяется в основном гравиметрическим методом. Метод основан на определении потери массы пробы после прокаливании при температуре 525°C .

Перед началом испытаний образцы почвы, поступившие на анализ, доводят до воздушно-сухого состояния. Масса воздушно-сухой пробы почвы должна быть не менее 1 кг. Почву измельчают и просеивают через сито с отверстиями диаметром 5 мм до тех пор, пока вся почва не пройдет через сито, тщательно перемешивают, методом квартования отбирают 150–200 г и помещают в коробку или банку. Приступая к анализу, всю почву из банки высыпают на лист стекла, пластмассы или полиэтиленовой пленки, распределяют тонким слоем не более 1 см, затем не менее чем из 5 мест отбирают пробы шпателем или ложечкой. Масса анализируемой пробы – от 3 до 5 г.

Чистые, сухие пронумерованные тигли прокалывают в муфельной печи при температуре $(525 \pm 25)^\circ\text{C}$, охлаждают в эксикаторе с хлористым кальцием с погрешностью не более 0,001 г. Проводят повторное прокалывание и взвешивание до установления постоянной массы.

Если расхождение между результатами взвешиваний не превышает 0,005 г, прокалывание заканчивают. Тигли хранят в эксикаторе с хлористым кальцием, периодически проверяя их массу.

Анализируемые пробы помещают в предварительно взвешенные фарфоровые тигли с таким расчетом, чтобы образец занимал не более 2/3 объема тигля, взвешивают их с погрешностью не более 0,001 г, помещают в холодный сушильный шкаф и нагревают его до 105°C .

Тигли с пробами, высушенными при $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ до постоянной массы, ставят в холодную муфельную печь и постепенно доводят температуру до 200°C . При появлении дыма печь отключают и дверцу приоткрывают. В течение 1 ч постепенно доводят температуру в муфельной печи до 300°C . После прекращения появления дыма печь закрывают, температуру в муфельной печи доводят до $(525 \pm 25)^\circ\text{C}$ и тигли прокалывают в течение 3 ч.

Тигли с зольным остатком вынимают из муфельной печи, закрывают их крышками и ставят в эксикатор. Охлажденные до комнатной температуры тигли взвешивают с погрешностью не более 0,001 г.

Несгоревшие частицы почвы дополнительно выжигают. Для этого в тигли добавляют несколько капель горячей дистиллированной воды температурой

более 90°C или 3 %-го раствора перекиси водорода и повторно прокалывают при температуре $(525 \pm 25)^\circ\text{C}$ в течение 1 ч, охлаждают в эксикаторе и взвешивают с погрешностью не более 0,001 г.

После охлаждения и взвешивания оценивают изменение массы зольного остатка. Если изменение массы в сторону уменьшения или увеличения будет менее 0,005 г, то анализ заканчивают и для расчета принимают наименьшее значение массы. При уменьшении массы на 0,005 г и более тигли с зольным остатком прокалывают дополнительно. Прокалывание заканчивают, если разность в массе при двух последовательных взвешиваниях будет менее 0,005 г.

Массовую долю зольности торфяных и оторфованных горизонтов грунтов (А), в процентах, вычисляют по формуле

$$A = (m - m_1) / m_2 \times 100,$$

где m – масса тигля с зольным остатком, г; m_1 – масса пустого тигля, г; m_2 – масса сухой почвы, г.

Допускаемые расхождения между результатами повторных определений от их среднего арифметического при выборочном статистическом контроле и доверительной вероятности $P = 0,95$ составляют, в процентах:

16,8 – при зольности 10 %;

8,4 – при зольности свыше 10 %.

Суммарная относительная погрешность метода, выражаемая коэффициентом вариации, составляет 6 % при зольности 10 % и 3 % при зольности свыше 10 %.

Относительное содержание органического вещества в процентах вычисляют по формуле $I_r = (100 - A)$, где A – массовая доля зольности, %.

В зависимости от содержания органического вещества грунты подразделяются согласно табл. 8.

Таблица 8

Классификация грунтов по относительному содержанию органического вещества

Грунт	Относительное содержание органического вещества I_r , %	
	пески	глинистые грунты
С примесью торфа	$0,03 \leq I_r \leq 0,10$	$0,05 \leq I_r \leq 0,10$
Слабозаторфованный	$0,10 < I_r \leq 0,25$	
Среднезаторфованный	$0,25 \leq I_r \leq 0,40$	
Сильнозаторфованный	$0,40 \leq I_r < 0,50$	
Торф	$I_r \geq 0,50$	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Методы геокриологических исследований: Учебное пособие / Под редакцией Э.Д. Ершова – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 512 с.
- [2] ГОСТ 25100–2011. Грунты. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2013. – 42 с.

- [3] Методические рекомендации по определению физико-механических свойств вечнотерзлых глинистых и песчаных грунтов в полевых условиях. – М.: ЦНИИС, 1987. – 64 с.
- [4] *Втюрин Б.И.* Подземные льды СССР. – М.: Наука, 1975. С. 215.
- [5] ГОСТ 5180–84. Грунты. Методы лабораторного определения физических свойств. – М.: Госкомитет по делам строительства, 1984. – 17 с.
- [6] *Мазуров Г.П.* Физико-механические свойства мерзлых грунтов. – Л.: Стройиздат, 1975.
- [7] *Пчелинцев А.М.* Строение и физико-механические свойства мерзлых грунтов А.М. Пчелинцев – М.: Наука, 1964. – 260 с.
- [8] *Вотяков И.Н.* Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии / И.Н. Вотяков – Нов-ск: Изд-во Наука, 1975. – 174 с.
- [9] Инженерно-геологический мониторинг промыслов Ямала. Т. II. Геокриологические условия освоения Бованенковского месторождения / В.В. Баулин, В.И. Аксенов, Г.И. Дубиков и др. – Тюмень: Ин-т проблем освоения Севера СО РАН, 1996.

II.2. Определение температуры замерзания и оттаивания, фазового состава влаги в промерзающих грунтах (Р.Г. Мотенко)

ТЕМПЕРАТУРА ЗАМЕРЗАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ

Для описания температуры фазовых переходов воды, заметно связанной поверхностью, теоретические формулы становятся неприменимыми, а первое место ставятся экспериментальные исследования.

Методика определения температур начала замерзания и окончания оттаивания порового раствора грунтовой влаги для обеспечения достоверности результатов должна учитывать особенности процесса промерзания исследуемого грунта.

Одним из основных источников погрешности определения температуры замерзания влажных грунтов является переохлаждение, необходимое для образования начальных кристаллов льда. По мнению крио-химиков, исследующих поведение водных солевых растворов, значительно более точные результаты дает метод, построенный на снятии кривых нагревания, который получил название метода “конца плавления”. Преимущество его состоит в том, что твердая фаза не склонна к перегреву и скорость плавления быстро возрастает с повышением температуры, что способствует быстрому установлению термодинамического равновесия между твердой и жидкой фазами.

Исследование засоленных грунтов подтвердило это преимущество и рекомендуется проводить для мерзлых грунтов определение именно *температуры оттаивания*.

ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ

Образцы пород естественного сложения вырезаются непосредственно металлическими цилиндрическими формами, в которых проводятся эксперименты.

Грунты нарушенного сложения подвергаются предварительной обработке, которая заключается в высушивании, размельчении и просеивании через сито с отверстиями диаметром 1 мм. Затем готовят грунтовую пасту из просеянного грунта и дистиллированной воды в необходимом соотношении. Пасту выдерживают в течение суток для равномерного распределения влажности. Затем пасту уплотняют в металлические формы. Формы имеют вид цилиндрических стаканчиков с двумя крышками диаметром 30 мм и высотой 40 мм. Одна из крышек имеет отверстие для ввода термопары. В геометрический центр образца помещается рабочий спай термопары.

ВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы грунта, приготовленные по выше описанной методике, промораживаются при -20°C (для грунтов с морским типом засоления эта температура

должна быть ниже). Заданная скорость промерзания обеспечивает в образцах массивную криогенную текстуру. Цикл оттаивания производится в воздушной среде при комнатной температуре. Хромель-копелевая термопара, подключенная к регистрирующей аппаратуре, фиксирует изменение температуры образца во времени. Свободные концы термопары находятся в сосуде Дьюара (термосе), где поддерживается температура 0°С за счет тающей смеси льда, приготовленного из дистиллированной воды. По окончании опыта записывается показание термопары при 0°С (рабочий спай термопары при этом помещается в сосуд Дьюара вместе со свободными концами). Влажность исследуемого образца грунта определяется весовым методом путем высушивания его в сушильном шкафу при температуре 105°С. Повторность определения – двойная.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Типичный вид термограммы оттаивания и ее графическая обработка представлены на рис. 1.

Ходу температуры во времени при оттаивании грунтов присущи три основных участка. Для первого характерно резкое изменение температуры за счет того, что теплоемкость грунтов при низких температурах мала из-за низкой интенсивности фазовых переходов. В то же время разность температур образца и окружающей среды велика, поэтому оттаивание идет высокими темпами. На втором участке отмечается слабое изменение температуры во времени, так как при приближении к температуре полного оттаивания грунта теплоемкость его за счет интенсивных фазовых переходов резко увеличивается. Наличие этого участка объясняется интенсивным поглощением скрытой теплоты плавления, затрачиваемой на разрушение кристаллической решетки льда. И наконец, третий участок кривой характеризуется возрастанием скорости повышения температуры, что происходит после прекращения фазовых переходов и резкого снижения теплоемкости грунта. Температура в точке перехода от второго к третьему участку – это температура оттаивания грунта, которая может быть получена из рис. 1.

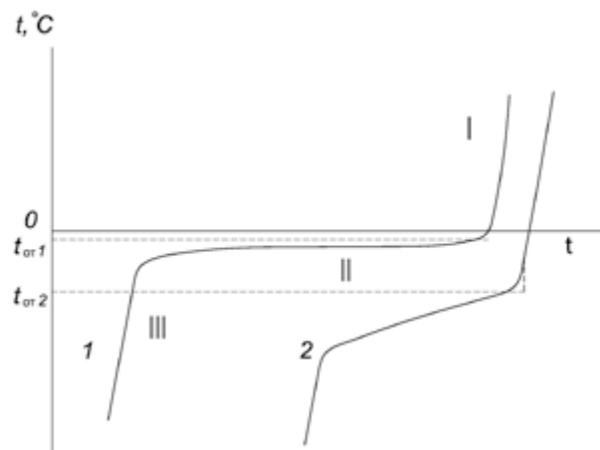


Рис. 1. Термограммы оттаивания мерзлых образцов грунта: 1 – незасоленного, 2 – засоленного

С уменьшением влажности убывает величина суммарного теплового эффекта, что приводит к снижению точности определения величины температуры оттаивания. Для незасоленных пород температурной границей применимости данной методики является значение $t = -1...-3^{\circ}\text{C}$. При исследовании засоленных грунтов температурный интервал, где происходит вымерзание (оттаивание) порового раствора, увеличивается с ростом концентрации порового раствора, термограмма выполаживается, что вызывает увеличение погрешности определения температуры оттаивания при ее графической обработке.

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ВЛАГИ

Под фазовым составом влаги в МГ понимают содержание льда, незамерзшей воды и пара. Газовая составляющая (пар), как правило, не учитывается в виду ее незначительного количества при влажности, равной полной влагоемкости. Содержание льда W_i и незамерзшей воды W_w измеряется в % или долях единицы по отношению к сухому грунту.

Разработано многочисленное количество методов исследования фазового состава воды в мерзлых породах (рис. 2). Некоторые из них в настоящее время практически не применяются из-за больших погрешностей (например, dilatометрический), и недостаточной их разработанности (ультразвуковой и другие геофизические методы). Определения фазового состава воды мерзлых грунтов дают количественное содержание одной из фаз: жидкой или твердой (паросодержание не учитывается). Содержание другой фазы рассчитывается путем дифференциации суммарного влагосодержания $W_w = W_c - W_i$. Объем и условия определений (количество точек по температуре, ее значения и т. д.) выбираются исходя из целей эксперимента.



Рис. 2. Методы определения фазового состава влаги

Для получения полной (достаточной для большинства задач) температурной зависимости необходимо выполнить определения для пяти значений температур, например, при $-0,5$ и $-1,2^{\circ}\text{C}$ (в области значительных фазовых переходов) и при -3 , -6 и -10°C (в переходной области и области практически замерзшего состояния). Согласно общепринятым принципам ведения экспериментов с хорошей воспроизводимостью результатов каждый опыт производится с трехкратной повторностью. Выбор метода диктуется областью его применения.

Рассмотрим несколько методов определения фазового состава влаги, применяемых в практике лабораторных исследований, например, калориметрический, контактный, криоскопический методы.

Калориметрический метод обеспечивает достаточно высокую точность и является распространенным методом исследования фазового состава влаги мерзлых пород лишь при научно-исследовательских работах. Для глинистых пород он считается эталонным методом определения содержания незамерзшей воды и льда в диапазоне температур от $-0,5$ до -10°C . Калориметрический метод основан на измерении теплового эффекта, возникающего при оттаивании (частичном или полном) мерзлой породы. Суммарное количество тепла, ушедшее на нагревание образца мерзлого грунта, складывается из теплоты плавления и теплоты, затраченной на повышение температуры воды и скелета грунта. Поскольку полная теплоемкость калориметра известна, то, зная изменение температуры калориметрической жидкости, в которой находится образец, можно определить фазовый состав воды в мерзлых породах. Калориметрическое определение содержания незамерзшей воды в мерзлой породе основано на измерении льдистости, а жидкая фаза находится по разности между общим содержанием воды и установленным количеством льда. Принимается, что теплота фазового перехода лед-связанная вода в порах грунта равна теплоте фазового перехода лед-свободная вода, и теплоемкость связанной воды принимается равной теплоемкости свободной воды.

Конструкция экспериментальной установки (рис.3) представляет собой цилиндрический сосуд с двойными стенками, пространство между которыми заполнено теплоизоляционным материалом. Сосуд заполняется водой или другой жидкостью и закрывается крышкой, на которой смонтировано устройство для перемешивания жидкости и регистрации ее температуры. Основная часть калориметрической установки – латунный никелированный стакан объемом 1500 мл с калориметрической жидкостью. Он помещается в камеру калориметра, снабженную эбонитовой крышкой, на которой смонтированы сетка для образцов, термометр Бекмана на 5°C , нагреватель и мешалка. В качестве жидкости при проведении опыта в области температуры выше 0°C используются органические жидкости с устойчивыми значениями теплоемкости, например спирт или толуол. Масса калориметрической жидкости принимается равной 1000 ± 1 г, причем взвешивание производится непосредственно в калориметрическом стакане.

Теплообмен изотермического калориметра учитывается соответствующими поправочными коэффициентами. Поправка на радиацию- (теплообмен) рассчитывается по формуле Пфаундлера – Усова Σ

$$\Delta t = \left[\sum_1^{n-1} t + ((t_0 - t_n)/2) - n\Theta_0 \right] (V'_{\Delta t} - V_{\Delta t}) / (\Theta_n - \Theta_0) + nV_{\Delta t}, \quad (1)$$

где n – число промежутков главного периода опыта; $\sum t$ – сумма температур калориметра, отсчитанных в течение главного периода через промежутки времени, равные 1 мин (за исключением последнего); $V'_{\Delta t} V_{\Delta t}$ – изменение температуры в один промежуток времени начального и конечного периодов (1 мин); Θ_0, Θ_n – средняя температура начального и конечного периода; теплообмен $t_n' = t_n + \Delta t$ начального и конечного периодов; t_0, t_n – начальная и конечная равновесные температуры главного периода.

Определение теплового значения калориметра по оттаиванию льда. В латунный никелированный бюкс соответствующего объема отбирается навеска 7–10 г дистиллированной воды, плотно закрывается крышкой и взвешивается с точностью до 0,01 г. Бюкс помещается в криостат или в ультратермостат, которые находятся в холодильном шкафу при температуре $-20 \dots -30^\circ\text{C}$, и выдерживается там в течение не менее 10 ч до полного замерзания воды. Затем криостат или ультратермостат с бюксом внутри переводится в условия, обеспечивающие создание в нем той температуры, для которой необходимо провести определение. Здесь бюкс выдерживается не менее 20 ч, и далее с ним проводится эксперимент. Тепловое значение калориметра F рассчитывается с использованием уравнения (1), в котором $t_D \equiv m_w, m_D \equiv 0$.

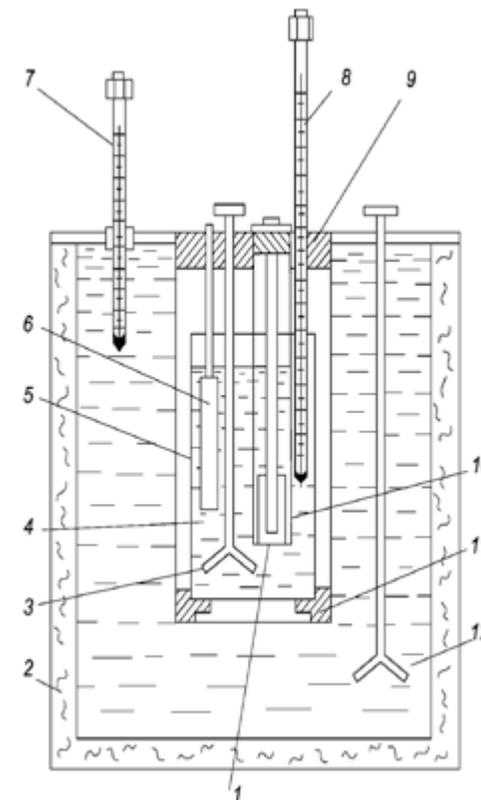


Рис. 3. Схема калориметрической установки: 1 – бюкс с образцом; 2 – изоляция; 3 – мешалка; 4 – калориметрическая жидкость; 5 – калориметрический стакан, 6 – нагреватель, 7 – термометр; 8 – термометр Бекмана; 9 – эбонитовая крышка, 10 – сетка для образца, 11 – подставка для калориметрического стакана, 12 – мешалка

Подготовка образцов. Из монолитов пород естественного сложения вырезают образцы, по форме и размерам отвечающие бюксам диаметром 20–30 и высотой 40 мм. В качестве вырезных колец используют те же тарированные латунные бюксы с острой кромкой. Образцы грунтов нарушенного сложения массой 400–500 г доводят до воздушно-сухого состояния, размельчают и просеивают через сито с отверстиями диаметром 1 мм. Затем готовится грунтовая паста из просеянного грунта при влажности, близкой к верхнему пределу пла-

стичности; паста выстаивается в течение 1 сут для перераспределения влаги. Приготовленной пастой наполняют 12 бюксов, которые взвешивают и сохраняют в эксикаторе с водой.

Латунные бюксы с грунтами помещают в ультратермостат, засыпают сухим песком и замораживают в холодильной камере при температуре $-20... -30^{\circ}\text{C}$ в течение 10–15 ч. При замораживании в криостате бюксы с грунтовой пастой подвешиваются к трубке криостата на капроновой нитке, закрепленной за петлю на крышке бюкса так, чтобы он висел в воздухе, а термометр для измерения температуры закрепляют в пробке. После этого бюксы термостатируются при необходимой для опыта температуре в ультратермостате или криостате 15–20 ч, а затем переносятся в калориметрический стакан.

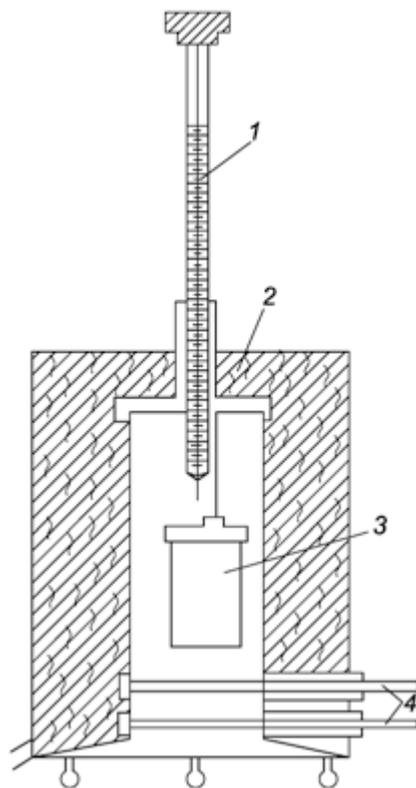


Рис. 4. Схема криостата: 1 – термометр ($-30 + 20^{\circ}\text{C}$);
2 – эвтектическая смесь;
3 – бюкс с образцом грунта; 4 – задвижки

Ведение эксперимента. До начала опыта на 10–20 мин включают мешалку для выравнивания температуры воды в калориметре. Отсчеты по термометру Бекмана в этот период снимаются через 5 мин. Когда в течение 10 мин изменение температуры в единицу времени приобретает постоянное значение (не более $0,002-0,003^{\circ}\text{C}$ в 1 мин), начинается калориметрический опыт. В этот период наблюдение за изменением температуры в калориметре производится с помощью термометра Бекмана со шкалой 5–6 С и ценой деления 0,01 С, что при работе с лупой (или другим оптическим устройством, позволяю-

щим увеличить изображение) дает возможность снимать отсчеты с точностью до $0,002-0,003^{\circ}\text{C}$.

Калориметрический опыт состоит из трех периодов: начального, главного и конечного.

За начальный период принимаются первые 10 мин (11 отсчетов через каждую минуту), в течение которых определяются изменение температуры в единицу времени V и температура начального периода t_0 .

Главный период начинается с момента погружения образца в калориметр до полного оттаивания образца – начала установления постоянного теплообмена, характеризующегося равномерным изменением температуры. Движение столбика ртути термометра Бекмана в главном периоде происходит быстро, поэтому отсчеты можно брать с точностью до $0,01-0,02^{\circ}\text{C}$. Конечный период включает 10 отсчетов через каждую минуту после установления равномерного изменения температуры.

После конечного периода с помощью термометра ТЛ–103 изменяется температура калориметрической жидкости и одновременно снимается отсчет по термометру Бекмана. По данным этих двух измерений рассчитывается температура жидкости в калориметре в начале и в конце главного периода. По окончании опыта бюкс с грунтом вынимается из калориметрической жидкости, высушивается при $+105^{\circ}\text{C}$ и взвешивается.

Обработка результатов. По данным калориметрического опыта рассчитывается масса льда в грунте m_l . Общее (суммарное) содержание воды и льда обозначим через m_w . Количество незамерзшей воды $m_{нз} = m_w - m_l$. Количество льда можно определить по уравнению теплового баланса из условия равенства тепловых эффектов поглощения тепла Q_1 , необходимого для нагревания до 0°C и оттаивания льда, нагревания скелета грунта, бюкса, незамерзшей воды и воды, образовавшейся при таянии льда, до температуры равновесия, с одной стороны, и отдачи тепла калориметром Q_2 при охлаждении его от температуры начала опыта до температуры равновесия, с другой.

Принимая температуру таяния льда равной 0°C , удельную теплоемкость жидкой фазы воды $1 \text{ кал/г}^{\circ}\text{C}$ (4200 Дж/(кг К)) и льда $C_l 0,5 \text{ кал/г}^{\circ}\text{C}$ (2100 Дж/кг К) и заменяя количество незамерзшей воды разностью $(m_w - m_l)$, получаем формулу для расчета массы льда (г)

$$m_l = [(m_k C_k + F)(t_0 - t_n) - (m_w C_w + m_d C_d + m_b C_b)(t'_n - t_{обр})] / (L + C_l t_{обр}) \quad (2)$$

где m_k, m_w, m_d, m_b – соответственно масса калориметрической жидкости, масса воды в образце грунта, масса скелета грунта, масса бюкса, в г; C_k – удельная теплоемкость калориметрической жидкости; C_w – удельная теплоемкость воды; C_d – удельная теплоемкость скелета грунта, равная обычно для песков $0,17$ (700), для супесей – $0,18$ (750), для суглинков – $0,19$ (800), для глин $0,20-0,21$ кал/г-град ($850-900 \text{ Дж/(кг К)}$); C_b удельная теплоемкость латунного бюкса – $0,09 \text{ кал/г-град}$ (38 Дж/(кг К)), $t_{обр}$ – температура образца; t_0 – температура начала опыта, приведенная к показаниям лабораторного термометра, $^{\circ}\text{C}$; t'_n – температура равновесия (с учетом поправки на теплообмен, приведенная к показаниям лабораторного термометра), $^{\circ}\text{C}$.

Запись экспериментов производится по форме, приведенной в табл. 1

Таблица 1

Форма записи экспериментов

$t_{нач}$	25,01	Глина mcQ_{III-IV}	Опыт № 2	Дата 20.05.2002
0	3,035	№ бюкса	6	
10	3,035	Масса бюкса	18,79 г	
1	3,034	Масса бюкса с влажным грунтом	31,56 г	
2	3,034	$t_{обp} = -0,77^{\circ}C$ Масса бюкса с сухим грунтом	28,86 г	
3	3,034	Масса воды	2,70 г	
4	3,034	Масса сухого грунта	10,07 г	
5	3,034	Суммарная влажность	26,8%	
6	3,034			
7	3,034	$t_0 - t_n = 3,034 - 2,653 = 0,381$		
8	3,034	$t'_n = 24,66 + (2,653 - 2,676) = 24,637$		
9	3,034	$t'_n - t_{обp} = 25,407$		
10	3,034	t_0		
11	2,800	$m_n = (201 + 500 \cdot 1)0,381 - 25,407(2,70 + 10,07 \cdot 0,21 + 18,79 \cdot 0,09) //$		
12	2,710	$(79,75 - 0,77 \cdot 0,5) = 1,28$		
13	2,666	$m_n = 1,28$ г		
14	2,654	$m_{нз} = 1,42$ г		
15	2,653	t_n		
16	2,655			
17	2,658	Содержание незамерзшей воды $W_w = 14,0\%$		
18	2,660	Содержание льда $W_i = 12,8\%$		
19	2,662			
20	2,665			
21	2,667			
22	2,668			
23	2,670			
24	2,672			
25	2,676			

Контактный метод определения фазового состава влаги в дисперсных породах является прямым методом и более простым, чем калориметрический. Метод основан на принципе динамического равновесия между льдом, незамерзшей водой и паром, которое возможно только в случае равенства химических потенциалов взаимодействующих фаз. Поэтому изменение термодинамических условий (p, T) приводит к изменению парциальной свободной энергии ΔF и образованию нового равенства химических потенциалов с учетом взаимодействующих масс. При контакте мерзлой льдонасыщенной породы с породой сухой или воздушно-сухой, влагосодержание в которой меньше количества незамерзшей воды при данной температуре, происходит влагообмен и насыщение более сухой породы влагой за счет интенсивного парового и пленочно-капиллярного переноса воды. Термодинамическое равновесие трех фаз влаги и прекращение насыщения водой первоначально сухой породы наступает через некоторое время. При этом суммарное влагосодержание первоначально сухой породы отвечает равновесному количеству незамерзшей воды при данной температуре.

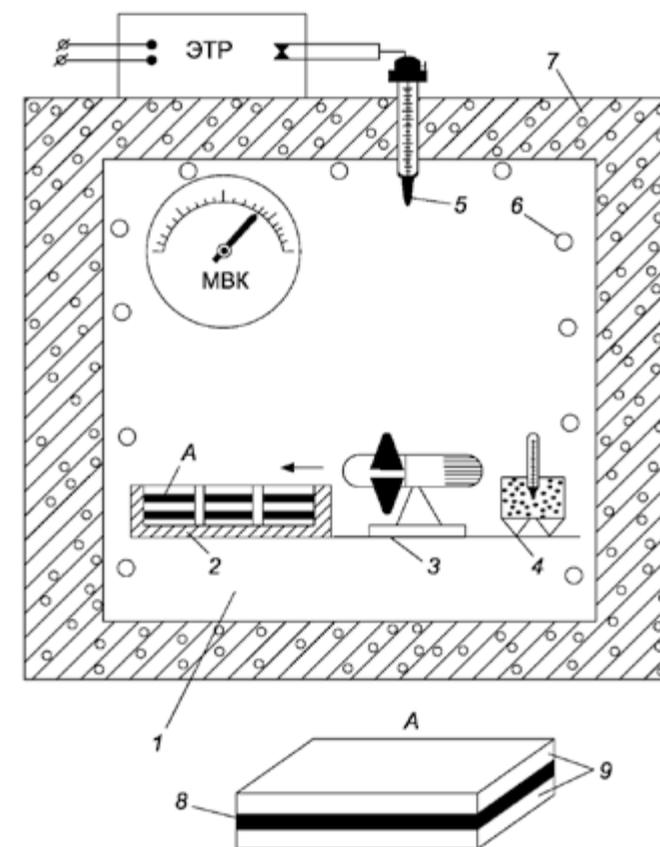


Рис. 5. Схема установки для определения фазового состава воды в мерзлых грунтах контактным методом: 1 – холодильный шкаф; 2 – кассета с образцами грунтов; 3 – вентилятор; 4 – контрольный термометр; 5 – контактный термометр; 6 – трубки испарителя; 7 – теплоизоляция; 8 – пластина сухого грунта; 9 – пластины мерзлого влагонасыщенного грунта (или льда)

В области интенсивных фазовых переходов (до $-2... -3^{\circ}\text{C}$) велика доля потока влаги по жидкой фазе в общем потоке, а доля потока пара значительно ниже, чем при температурах ниже -10°C . Вследствие этого периоды насыщения влагой к моменту динамического равновесия при температурах выше $-2... -3^{\circ}\text{C}$ и ниже -10°C оказываются близкими и значительно более краткими, чем в промежуточном диапазоне температур.

Подобные закономерности протекания поглощения влаги в дисперсных породах в изотермических условиях закрытой системы при отрицательной температуре определяют и время установления динамического равновесия потенциалов трех фаз воды при контакте льдонасыщенной и сухой породы или сухой породы со льдом. Время установления насыщения в диапазоне температур $-0,5... -20^{\circ}\text{C}$ составляет в зависимости от типа грунта от суток и более.

Для определения фазового состава влаги в мерзлых породах контактным методом может быть использована экспериментальная установка на базе любого холодильного агрегата, способного длительное время поддерживать изотермические условия с точностью $\pm 0,1-0,2^{\circ}\text{C}$ в холодильном шкафу, снабженном терморегулировкой (рис. 5). Равномерное распределение температурного поля в объеме холодильного шкафа создается вентилятором.

Подготовка образцов. Для определения фазового состава влаги в мерзлых породах контактным методом могут быть использованы мерзлые и талые монолиты и образцы нарушенной структуры, подготовленные в виде брикетов с массивной криогенной текстурой размером $30 \times 40 \times 25 \text{ мм}^3$. Из этих брикетов вырезают три пластины толщиной 5 мм и отбираются пробы на определение суммарной влажности. Пластины оттаивают и высушивают при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния. Параллельно приготавливают четыре пластины аналогичных размеров изо льда или мерзлых влагонасыщенных грунтов того же состава, что и исследуемые. Все пластины охлаждаются в холодильной камере, с температурой на $1-2^{\circ}\text{C}$ ниже заданной для определения фазового состава влаги в исследуемом грунте. Затем пластины осторожно, без нарушения термических условий, переносят в холодильную камеру, где зачищают, чтобы обеспечить параллельность больших плоскостей и улучшить контакт при соприкосновении льдонасыщенной и сухой пластин. Подготовленные таким образом образцы выдерживают 1 ч в холодильной камере, после чего собирают вместе так, чтобы образовалась слоистая кассета, где своими большими плоскостями контактирует каждая сухая пластина с двумя пластинами льда (либо мерзлой влагонасыщенной породы).

Проведение эксперимента и обработка результатов. Загерметизированные полиэтиленовой пленкой и обжатые снаружи тоненькой резинкой кассеты с пластинами помещаются в холодильный шкаф с вентилятором, где предварительно установлена заданная температура. Через несколько дней вынимают грунтовые пластины, которые очищают ножом со всех сторон, и весовым методом определяют влажность, отвечающую величине W_w при температуре опыта. Отклонение от среднего значения по влажности не должно превышать ошибки определения содержания незамерзшей воды данным методом. Ошибка контактного метода определения содержания незамерзшей воды в дисперсных породах составляет $\pm 0,3\%$.

Исследование температурной зависимости содержания незамерзшей воды и льда можно проводить на одних и тех же сухих пластинах, повторяя проделанные операции при разных температурах. Если имеется несколько холодильных шка-

фов, то установив в каждом из них необходимые температуры, можно получить искомую зависимость значительно быстрее, при этом все операции для каждого значения температуры проводятся отдельно. Учитывая объем холодильных шкафов, можно в каждом из них вести параллельные определения сразу для большого количества типов мерзлых пород. На основании полученных результатов строится график зависимости содержания незамерзшей воды и льда от температуры.

Криоскопический метод использует выделение скрытой теплоты кристаллизации (или же поглощение теплоты плавления) и понижение температуры замерзания (плавления) воды в порах грунтов. Эксперимент заключается в том, чтобы точно установить эту температуру и ее зависимость от влажности пород. При этом нужно учитывать, что содержание незамерзшей воды в мерзлом грунте при температуре t_0 равно той влажности грунта, которой соответствует температура t_0 его замерзания или оттаивания. Если в методах определения W_w определяется зависимость $W_w = f(t)$, то в данном случае, наоборот, экспериментально определяется соответствие температуры замерзания и оттаивания грунта заданной влажности W , т.е. $t_{з-от} = f(W)$. Цикл опытов, проведенных на образцах грунта с разной влажностью, например, W_p , W_{mg} , W_l и промежуточными значениями, позволяет получить зависимость температуры замерзания и оттаивания грунта от его влажности, т.е. $W_w = f(t)$. Затем строят график, по оси ординат которого откладывают влажность образца, а по оси абсцисс — температуру замерзания (или оттаивания). Этот график характеризует зависимость содержания незамерзшей воды от температуры в цикле замерзания (оттаивания). Следует еще раз подчеркнуть, что для мерзлых грунтов рекомендуется проводить определение именно температуры оттаивания, чтобы избежать погрешностей, связанных с переохлаждением.

Поскольку тепловой эффект должен быть ощутим, использование метода наиболее целесообразно при температурах от 0 до -3°C .

Для получения зависимости содержания незамерзшей воды в широком диапазоне температур, например, от 0 до -20°C , рекомендуется использование комбинации криоскопического метода в цикле оттаивания и контактного метода.

Глава написана с использованием литературных источников [1; 2; 3; 4; 5].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Ершов Э.Д., Мотенко Р.Г., Комаров И.А.* Экспериментальное исследование теплофизических свойств и фазового состава влаги засоленных мерзлых грунтов. // *Геоэкология*, № 3, 1999. С. 232–242.
- [2] *Кудрявцев В.А., Ершов Э.Д., Чевеверев В.Г., Лебедеженко Ю.П., Зыков Ю.Д.* Изучение состава, строения и свойств мерзлых пород в целях освоения нефтяных и газовых месторождений. // *Мерзлотные исследования*. — М.: Изд-во МГУ, 1983. С. 10–24.
- [3] *Методы геокриологических исследований: Учеб. пособие / Под ред. Э.Д. Ершова / Изд-во МГУ. 512 с.*
- [4] *Мотенко Р.Г.* Фазовый состав влаги в мерзлых грунтах. // *Российская геологическая энциклопедия*, Изд-во ВСЕГЕИ М — СПб.: том. 3. С. 367.
- [5] *Фазовый состав влаги в мерзлых породах.* Под редакцией Э.Д. Ершова. — М.: Изд-во МГУ, 1979. 212 с.

II.3. Компрессионные испытания мерзлых грунтов (П.И. Котов)

В лабораторных условиях методом компрессионного сжатия определяют деформационные характеристики: коэффициент сжимаемости и модуль деформации. Испытания проводятся в одометре с жесткими боковыми стенками. Горизонтальные деформации отсутствуют.

При деформировании мерзлых грунтов происходит ряд теплофизических, механических, физико-химических процессов. В общем виде деформацию мерзлых грунтов S можно представить следующим образом [1]:

$$S = S_{yn} + S_n + S_{\phi} + S_J, \quad (1)$$

где: S_{yn} – деформация грунта за счет упругого сжатия его компонентов; S_n – деформация грунта, обусловленная закрытием свободных от жидкого и твердого компонентов пор; S_{ϕ} – деформация грунта, обусловленная фазовым переходом лед-незамерзшая вода; S_J – деформация грунта за счет оттока незамерзшей воды из образца.

Следует отметить, что разделение процесса деформирования на отдельные фазы является условным, поскольку в любой момент времени все указанные процессы действуют одновременно и каждый член уравнения может значительно отличаться в зависимости от состава, строения, температуры и режима нагружения.

Упругая составляющая S_{yn} играет основную роль при низких температурах льдонасыщенных мерзлых грунтов на фоне незначительных в этих условиях величин остальных составляющих.

Доля деформаций S_n может быть значительной лишь при неполной степени заполнения пор. Если внешняя нагрузка на мерзлый грунт превысит его структурную прочность, то деформация грунта, обусловленная закрытием свободных пор от жидкого и твердого компонентов, станет прямо пропорциональной сжатию пустых пор, что определяется по изменению коэффициента пористости грунта.

Доля деформаций S_{ϕ} изменяется при компрессии сжимаемых мерзлых грунтов и может достигать 9% объема влаги при смещении фазового равновесия между льдом и незамерзшей водой под действием давления.

В ходе компрессионного сжатия часть незамерзшей воды может отжиматься из объема мерзлого грунта S_J . Главным фактором протекания S_J является механизм трансформации внешнего механического давления в поровое давление.

ПРИБОРЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Приборы, используемые для компрессионных испытаний мерзлого грунта, аналогичны компрессионным установкам, предназначенным для обычных, немерзлых грунтов, и состоят из трех основных частей: одометра или прибора, в котором непосредственно сжимают мерзлый грунт; рычажного пресса, при помощи которого осуществляют передачу нагрузки на образец, и измерительной аппаратуры для определения осадок (рис. 1). Первоначально компрессионный прибор изготавливался из органического стекла (плексигласа), плохие

теплопроводные свойства которого позволяли сохранять постоянную температуру образца грунта при небольших колебаниях температуры окружающей среды (ГОСТ 19707–74). Однако с начала 90-х годов (ГОСТ 24586–90) описана возможность использования металлических приборов.

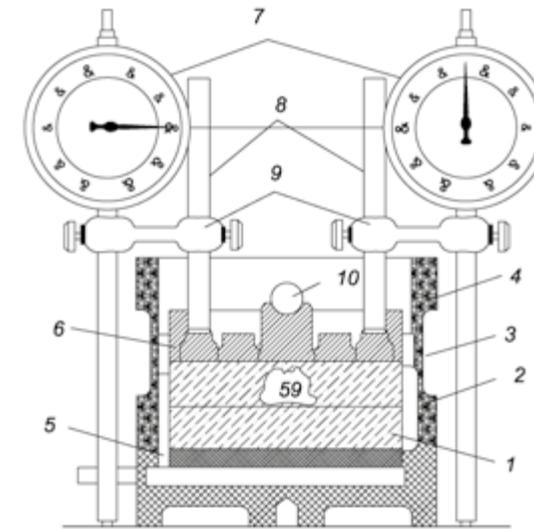


Рис. 1. Схема прибора для определения сжимаемости мерзлого грунта
1 – образец грунта; 2 – рабочее кольцо; 3 – направляющее кольцо;
4 – направляющий цилиндр (обойма); 5 – перфорированный поддон;
6 – перфорированный штамп; 7 – индикаторы; 8 – стойки для крепления индикаторов;
9 – подвижной кронштейн; 10 – шарик для точечной передачи нагрузки

Условия проведения опыта [2]:

- 1) толщина прослоек льда в образце должна быть не более 2 мм;
- 2) льдистость грунта за счет видимых ледяных включений должна быть меньше или равна 0,4;
- 2) образцы должны иметь форму цилиндра диаметром не менее 70 мм и отношением высоты к диаметру от 1/2 до 1/3,5.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Перед началом испытания образец помещается в холодильную камеру на сутки при температуре испытаний.

Испытания проводятся в три этапа:

I этап – обжатие образцов мерзлого образца при отрицательной температуре под максимальной нагрузкой, соответствующей величине давления на последней ступени, необходимо выдерживать различный период времени в зависимости от температуры:

- выше минус 2°C – 15 с;
- ниже минус 2°C – 30 с.

При обжатию штамп необходимо поворачивать вокруг его оси на 90° четыре раза.

II этап – уплотнение мерзлого грунта под природной нагрузкой;

III этап – уплотнение мерзлого грунта ступенчато-возрастающей нагрузкой. Общее количество ступеней должно быть пять. Давление на каждой ступени задается в зависимости от расчетного давления R на последней ступени $1,2R > P > R$, (где R – расчетное давление на мерзлый грунт, МПа (табл. 1).

При этом приращение нагрузки на одну ступень должно быть не меньше $0,1$ МПа для песчаных и глинистых грунтов при температуре ниже минус 2°C ; $0,05$ МПа при температуре выше минус 2°C . Деформация замеряется через 1, 5, 10, 15, 20, 30 мин, 1, 2, 4, 6, 8, 24 ч и затем через каждые 12 часов до условной стабилизации деформации, которая принимается равной $0,01$ мм за 12 часов.

После завершения испытаний образец с грунтов взвешивается и высушивается в сушильном шкафу для расчета влажности до и после испытания.

Таблица 1

Расчетные значения сопротивления мерзлого грунта в зависимости от льдистости грунтов и температуры испытаний (согласно ГОСТ 12248–2010)

Грунты	Значения сопротивления мерзлого грунта R , МПа, при температуре испытаний T , $^\circ\text{C}$											
	-0,3	-0,5	-1	-1,5	-1	-2,5	-3	-3,5	-4	-6	-8	-10
При льдистости грунтов $i_j < 0,2$												
1 Пески средней крупности	0,55	0,95	1,25	1,45	1,6	1,8	1,95	2,0	2,2	2,6	2,95	3,3
2 Пески мелкие и пылеватые	0,45	0,7	0,9	1,1	1,3	1,4	1,6	1,7	1,8	2,2	2,55	2,86
3 Супеси	0,3	0,5	0,7	0,8	1,05	1,15	1,30	1,40	1,5	1,9	2,25	2,5
4 Суглинки и глины	0,25	0,45	0,55	0,65	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,55	1,9	2,2
При льдистости грунтов $i_j \geq 0,2$												
Все виды грунтов, указанные в 1-4	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75	0,85	0,95	1,25	1,55	1,75

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Суммарная величина деформации грунта с учетом деформации прибора, определенная по показаниям индикаторов, записывается в рабочий журнал (табл. 2).

Таблица 2

Журнал испытаний

Время отчета	Время от начала опыта t , час	Номер ступени нагружения	Давление на образец грунта, МПа	Показания индикатора деформаций, мм	Абсолют. деформ. образца S , мм	Относит. деформ.
2	3	4	5	6	7	8

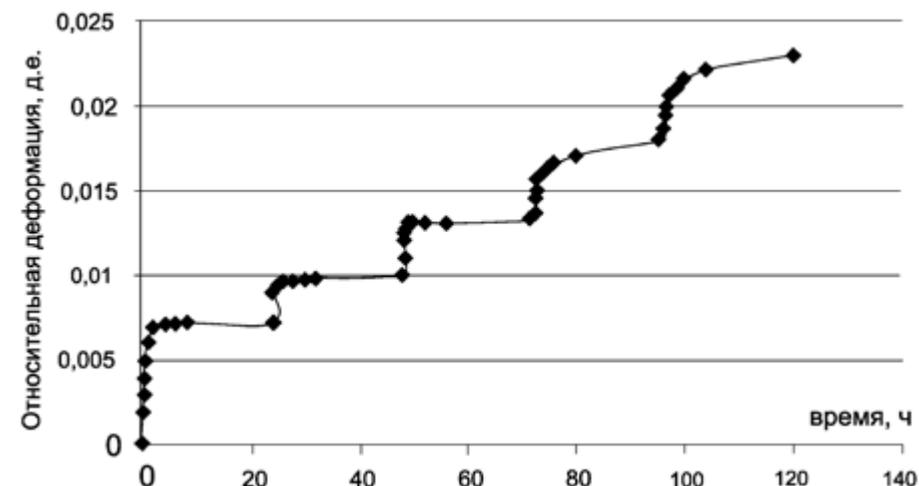


Рис. 2. Зависимость развития относительной осадки от времени на каждой ступени нагрузки

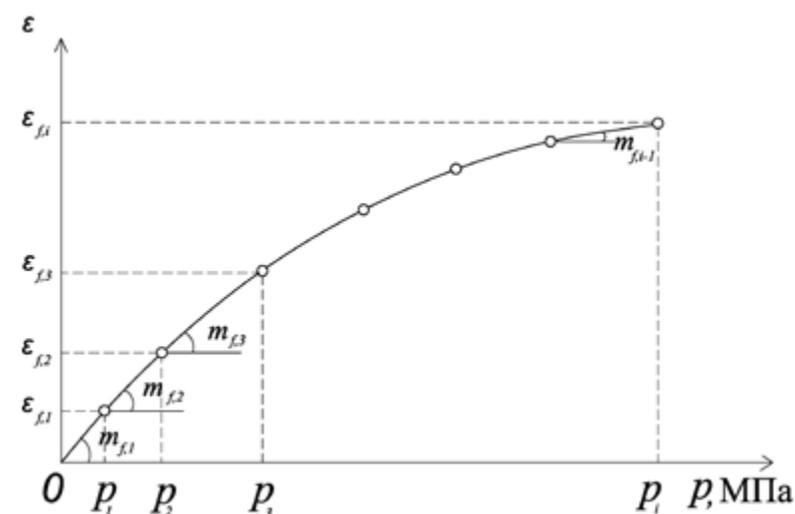


Рис. 3. Зависимость развития относительной условно-стабилизированной осадки от напряжения

По полученным данным рассчитывается относительная деформация грунта, равная отношению абсолютной деформации (S , мм) к первоначальной высоте образца (h , мм).

Строится график изменения относительной деформации грунта во времени на каждой ступени нагрузки (рис. 2). Затем строится график стабилизированной деформации от напряжения (рис. 3), по которому определяется величина коэффициента сжимаемости.

Коэффициенты сжимаемости грунта $m_{f,i}$, МПа⁻¹, определяют в соответствии с ГОСТ 12248–2010 как величины, численно равные тангенсам углов наклона a_i прямых, в заданном интервале давлений с точностью 0,001 МПа⁻¹ по формуле:

$$m_{f,i} = \frac{\varepsilon_{f,i+1} - \varepsilon_{f,i}}{p_{f,i+1} - p_{f,i}}, \quad (2)$$

По значениям коэффициента сжимаемости $m_{f,i}$ может быть вычислен модуль деформации $E_i = \beta / m_{f,i}$, где β – коэффициент, равный 0,8.

Однако следует отметить, что в соответствии с ГОСТ 12248 –96 коэффициенты сжимаемости мерзлого грунта $m_{f,i}$ МПа⁻¹, определяли с точностью 0,001 МПа⁻¹, как величины численно равные тангенсам углов наклона a_i прямых, проведенных с начала координат через точки p_i и $\varepsilon_{f,i}$ (рис. 4) по формуле:

$$m_{f,i} = \operatorname{tg} \alpha_i = \frac{\varepsilon_{f,i}}{p_i},$$

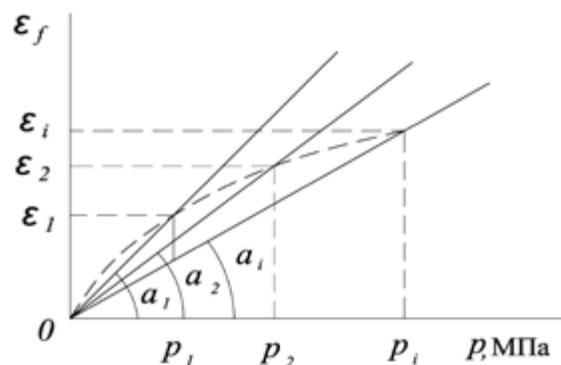


Рис. 4. Схема расчета коэффициентов сжимаемости в соответствии с ГОСТ 12248 –1996. Практическое задание

Привести описание образца (табл. 2), заполнить журнал испытаний (табл. 3), вычислить деформационные характеристики мерзлых грунтов по данным испытаний. Результаты оформить в соответствии с примером оформления, приведенным ниже.

Таблица 2

Описание грунта	
Номер скважины:	1
Глубина отбора, м:	3
Наименование грунта:	суглинок
Плотность, г/см ³	1,87
Влажность, %	31
Влажность после испытаний, %	30
Влажность нижнего предела пластичности, %	17
Влажность верхнего предела пластичности, %	27
Температура испытаний, °С	–4

Таблица 3

Журнал испытаний

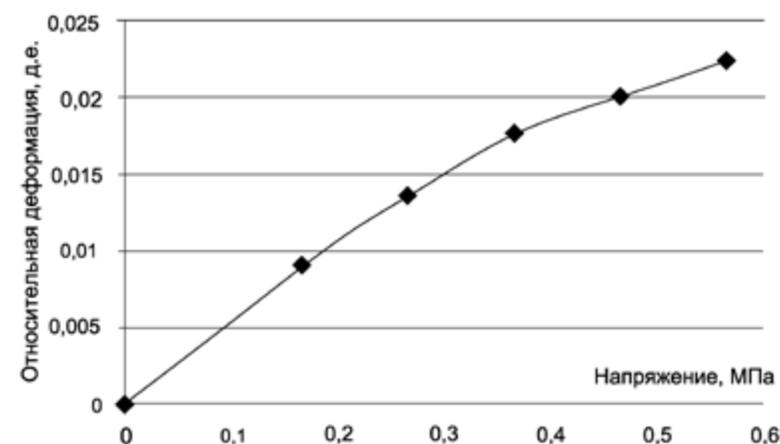
Время отчета	Время от начала опыта t , час	Номер ступени нагружения	Давление на образец грунта, МПа	Показания индикатора деформаций, мм	Абсолют. деформ. образца S , мм	Относит. деформ. ε
2	3	4	5	6	7	8
0	0	1		8		
0,083	0,083			7,981		
0,170	0,17			7,971		
0,3	0,33			7,961		
0,5	0,5			7,951		
1	1			7,94		
2	2			7,93		
4	4			7,929		
6	6			7,929		
8	8			7,928		
24	24			7,928		
0	24	2		7,916		
0,083	24,083			7,913		
0,170	24,17			7,911		
0,3	24,33			7,909		
0,5	24,5			7,908		
1	25			7,906		
2	26			7,906		

Время отчета	Время от начала опыта t , час	Номер ступени нагружения	Давление на образец грунта, МПа	Показания индикатора деформаций, мм	Абсолют. деформ. образца S , мм	Относит. деформ. ϵ
2	3	4	5	6	7	8
4	28			7,905		
6	30			7,903		
8	32			7,902		
24	48			7,9		
0	48	3		7,884		
0,083	48,083			7,878		
0,170	48,17			7,875		
0,3	48,33			7,872		
0,5	49			7,87		
1	49			7,869		
2	50			7,869		
4	52			7,869		
8	56			7,869		
24	72			7,868		
0	72	4		7,868		
0,083	72,083			7,862		
0,170	72,17			7,854		
0,3	72,33			7,85		
0,5	72,5			7,844		
1	73			7,842		
2	74			7,838		
4	76			7,834		
8	80			7,828		
24	96			7,82		
0	96	5		7,82		
0,083	96,083			7,813		
0,170	96,17			7,808		
0,3	96,33			7,806		
0,5	96,5			7,8		
1	97			7,793		
2	98			7,79		
4	100			7,784		
8	104			7,778		
24	120			7,77		

Пример оформления результатов испытаний

Номер скважины:	46
Глубина отбора, м:	5
Наименование грунта:	суглинок
Плотность, $г/см^3$	1,87
Влажность, %	24
Влажность после испытаний, %	23
Влажность нижнего предела пластичности, %	17
Влажность верхнего предела пластичности, %	27
Температура испытаний, $^{\circ}C$	-3

Зависимость относительной условно-стабилизированной деформации от напряжения



Результаты расчета деформационных характеристик

№ ступени	σ , МПа	ϵ , д.е.	m_f , $МПа^{-1}$	E , МПа
1	0,166	0,009	0,054	14,8
2	0,266	0,014	0,046	17,4
3	0,366	0,018	0,040	20,0
4	0,466	0,020	0,024	33,3
5	0,566	0,022	0,023	34,8

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чеве́рев В.Г. Природа криогенных свойств грунтов/В.Г. Чеве́рев. – М.: Научный мир, 2004. – 234 с.
2. ГОСТ 12248–2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – М.: Стандартинформ, 2011. – 109 с.

II.4. Компрессионные испытания оттаивающих грунтов (П.И. Котов)

Деформирование оттаивающих грунтов обусловлено развитием ряда тепло-физических, механических, физико-химических процессов. Деформацию мерзлых грунтов при оттаивании S в общем виде можно представить следующим образом [1]:

$$S = S_d + S_{см} + S_d + S_{yc} - S_{наб} - S_J, \quad (1)$$

где: S_d – деформация грунта за счет объемных фазовых изменений при переходе льда в воду; $S_{см}$ – деформация грунта, обусловленная преобразованием структуры и текстуры (смыкание макропор) при консолидации оттаивающего грунта за счет действия собственного веса; S_d – деформация грунта, обусловленная преобразованием структуры и текстуры (смыкание макропор) при консолидации оттаивающего грунта за счет внешней бытовой нагрузки; S_{yc} – деформация грунта за счет усадки; $S_{наб}$ – деформация грунта за счет набухания; S_J – деформация грунта за счет сегрегационного льдовыделения в мерзлой зоне.

Следует отметить, что разделение процесса деформирования на отдельные фазы является условным, поскольку в любой момент времени все указанные процессы действуют одновременно.

Соотношение (1) является итогом работы большого числа исследователей. Исследования процессов промерзания-оттаивания, выполненные на кафедре геофизиологии МГУ под руководством Э.Д. Ершова, позволили дополнить это соотношение составляющими, связанными с усадкой и миграцией влаги.

Соотношения выделенных процессов в общей деформации мерзлых грунтов при оттаивании неравнозначны и зависят от литологии, текстуры, давлений, действующих при оттаивании, скорости оттаивания и температурных градиентов в подстилающей мерзлой зоне, времени консолидации оттаявшего грунта. Рассмотрим отдельно каждый из выделенных процессов.

Деформация грунта за счет объемных фазовых изменений обусловлена фазовым переходом льда в воду, при котором происходит уменьшение объема на 9,1%. Для оттаивающих песчаных и тонкодисперсных грунтов массивной текстуры эти деформации являются определяющими.

Деформации, обусловленные преобразованием структуры и текстуры за счет действия собственного веса и внешней нагрузки, включает осадки за счет вытравливания ледяных шпиров с образованием макропор и изменением пространственного взаиморасположения текстурных элементов и зависят от величины давления, литологического состава, криогенной текстуры, льдистости. Деформация грунта в результате усадки при оттаивании заключается в обезвоживании талой зоны вследствие миграции влаги в мерзлую зону, в результате происходит сближение частиц, уменьшение пористости, укрупнение микроагрегатов, их переориентировка. Деформация грунта за счет процесса набухания связана с набуханием плотных минеральных прослоев при переносе в них влаги из оттаявших ледяных шпиров. При набухании происходит расклинивающее действие водных пленок, что вызывает рост гидратных оболочек вокруг глинистых частиц, увеличение пористости и уменьшение сжимающих эффективных напряжений в скелете грунта.

Деформация грунта за счет сегрегационного льдовыделения в оттаивающих породах обусловлена миграцией влаги из оттаявшей зоны в мерзлую при наличии градиента температуры в последней. В результате образуется избыточное количество влаги, не соответствующее равновесному значению при данной температуре, заморозание ее в итоге приводит к образованию сегрегационного льда. Итогом этого процесса является возникновение положительных деформаций, уменьшающих деформацию осадки [2].

ПРИБОРЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Н.А. Цытович [3] разработал специальный прибор (одеметр) и методику определения деформационных характеристик оттаивающих грунтов. В приборе выполняется условие одностороннего оттаивания. Оттаивание происходит только сверху через металлический штамп с положительной температурой. Нагрузка подается через рычажную систему. Отношение диаметра образца к длине равняется 1 к 2. Этот прибор используется исследователями и в настоящее время.

В настоящее время исследователями используется практически тот же самый прибор с небольшими дополнениями: датчиками температуры, давления, другими материалами корпуса, но принципиальная схема остается такая же, какая была разработана Цытовичем (табл. 1).

В то же время ряд исследователей создали специальные установки, которые в настоящее время практически не используются. Так, Хейфиц В.З. и др. разработали приборы, исключющие трение по боковой поверхности образцов. С этой целью рабочее кольцо выполнялось из набора жестких в радиальном и податливых в осевом направлении колец, что обеспечивало отсутствие касательных напряжений на боковой поверхности.

На кафедре геофизиологии геологического факультета МГУ используется прибор КГ–1 для испытаний, учитывающий трение по боковой поверхности. В основании прибора устанавливается динамометр. Разность между нагрузкой, передаваемой с помощью рычага, и нагрузкой, фиксируемой динамометром, определяет силу трения по боковой поверхности образца.

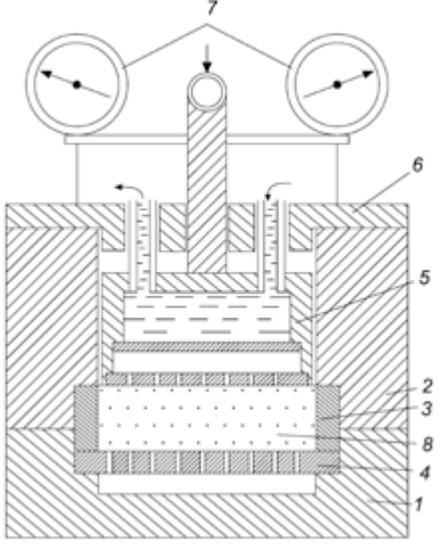
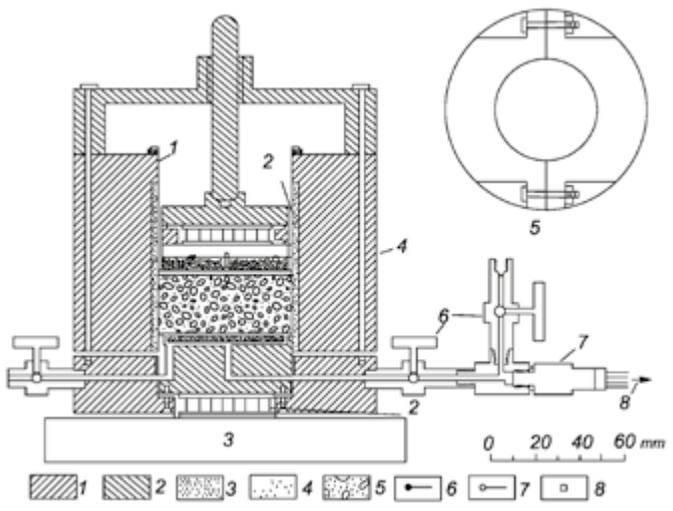
В практике лабораторных инженерно-геофизиологических изысканий достаточно часто используются обычные компрессионные приборы, в которых происходит всестороннее оттаивание. Как показали исследования Котова П.И. [7], при быстром оттаивании значения деформационных характеристик, полученных при одностороннем и всестороннем оттаивании, практически не отличаются.

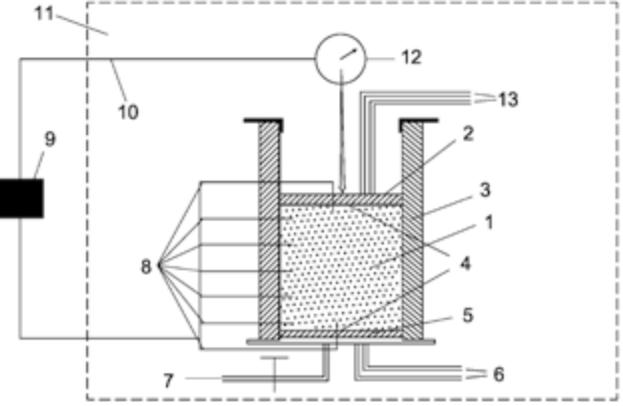
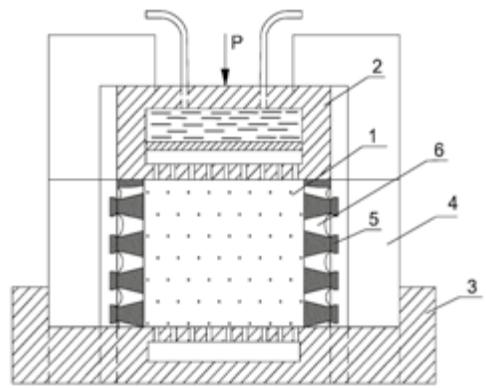
УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- 1) толщина прослоек льда в образце должна быть не более 2 мм;
- 2) льдистость грунта за счет видимых ледяных включений должна быть меньше или равна 0,4;
- 3) образцы должны иметь форму цилиндра диаметром не менее 70 мм и отношением высоты к диаметру 1/2.

Таблица 1

Схемы модификаций одометров

Вид прибора	Название, ссылка
Условные обозначения	
	Одометр [3]
1 – основание; 2 – направляющий цилиндр; 3 – рабочее нетеплопроводное кольцо; 4 – перфорированный диск; 5 – штамп; 6 – крышка; 7 – индикаторы; 8 – грунт	
	Пермоуд [4]
1 – люлит; 2 – алюминий; 3 – пористая пластинка нержавеющей; 4 – тефлон; 5 – образец грунта; 6 – термистор; 7 – термопара; 8 – кольца. Цифры на рисунке: 1 – резиновая мембрана; 2 – направление к источнику постоянного тока; 3 – охлаждаемая емкость; 4 – разъемное кольцо; 5 – деталь разъемного кольца (вне масштаба); 6 – краны; 7 – датчик; 8 – показатель деформации	

Вид прибора	Название, ссылка
Условные обозначения	
	Одометр [5]
Компрессионный прибор с датчиками температуры и давления: 1 – грунт; 2 – верхний штамп; 3 – плексигласовый корпус; 4 – фильтровальная бумага; 5 – нижний штамп; 6 – датчики силы; 7 – отвод воды; 8 – датчики температуры; 9 – компьютер; 10 – датчик перемещения; 11 – холодильная камера; 12 – мессура	
	Одометр с податливыми стенками [6]
1 – грунт; 2 – верхний штамп; 3 – плексигласовый корпус; 4 – фильтровальная бумага; 5 – нижний штамп; 6 – датчики силы; 7 – отвод воды; 8 – датчики температуры; 9 – компьютер; 10 – датчик перемещения; 11 – холодильная камера; 12 – мессура	

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Перед началом испытания образец должен быть помещен в холодильную камеру на сутки при температуре испытаний.

Испытания по определению деформационных характеристик оттаивающих грунтов проводятся в три этапа.

I этап – уплотнение мерзлого образца при отрицательной температуре под природным давлением, которое должно быть равно напряжению от собственного веса грунта на глубине отбора образца.

Вид прибора	Название, ссылка
Условные обозначения	
	КГ-1 [6]
1 – образец грунта; 2 – грунтонос; 3 – переходник; 4 – коронка; 5 – нижний штамп; 6 – динамометр; 7 – индикатор	

II этап – оттаивание образца при этой же нагрузке.

Уплотнение мерзлого и оттаивающего образца проводится до условной стабилизации. За условную стабилизацию принимается изменение показаний индикатора, равное 0,01 мм за 12 ч.

В период оттаивания образца измеряют деформацию через 5 мин после начала, затем через каждые 10 минут до двух часов, затем 4, 6, 8, 24 ч и до условной стабилизации деформации.

III этап – уплотнение оттаявшего образца ступенчато-возрастающей нагрузкой. После стабилизации деформаций оттаявшего грунта нагрузку увеличивали на 0,05 МПа для глинистых грунтов и на 0,075 МПа для песчаных грунтов. Каждая ступень нагрузки удерживалась до условной стабилизации осадки, которая принимается также равной 0,01 мм за 12 часов. Общее количество ступеней должно быть не менее пяти.

После завершения испытаний образец с грунтом взвешивается и высушивается в сушильном шкафу для расчета влажности до и после оттаивания.

Обработка экспериментальных данных

1. По показаниям индикаторов записывается в рабочий журнал (табл. 3) величина деформации грунта с учетом деформации прибора.
2. Рассчитывается относительная деформация грунта, равная отношению абсолютной деформации (S , мм) к первоначальной высоте образца (h , мм).
3. Строится график изменения относительной деформации грунта во времени при каждой ступени нагрузки, по которому определяется величина условно-стабилизированной деформации (рис. 1.а).
4. Строится график зависимости условно-стабилизированной деформации грунта от напряжения (рис. 1.б).
5. Определяются деформационные характеристики оттаивающего грунта: коэффициент оттаивания (A), равный относительной стабилизированной осадке оттаивания без нагрузки, и коэффициент сжимаемости m , равный тангенсу угла наклона прямой к оси абсцисс.

Расчетные значения деформационных характеристик A и m при определении осадок оттаивающего основания следует умножать на поправочный коэффициент $k_i = 1 + \Delta i$, где Δi – разность между суммарной льдистостью i -го слоя грунта и льдистостью испытанного образца, взятого из этого слоя. Допускается вводить поправки за неполное смыкание макропор и набухание оттаивающего грунта, если это подтверждено экспериментальными данными.

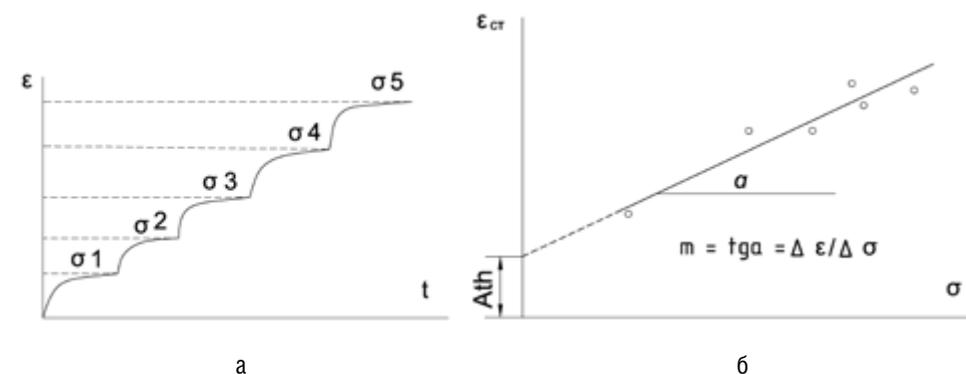


Рис. 1. Зависимости развития относительной осадки от времени при каждой ступени нагружения (а), относительной условно-стабилизированной осадки от напряжения (б)

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Привести описание образца (табл. 2), заполнить журнал испытаний (табл. 3), вычислить деформационные характеристики оттаивающих грунтов по данным испытаний. Результаты оформить в соответствии с примером оформления, приведенным ниже.

Описание грунта

Номер скважины:	1
Глубина отбора, м:	3
Наименование грунта:	суглинок
Плотность, г/см ³	1,67
Влажность, %	31
Влажность после оттаивания, %	18
Влажность нижнего предела пластичности, %	17
Влажность верхнего предела пластичности, %	27

Таблица 2

Журнал испытаний

Время	Время от начала опыта t, час	Номер ступени нагружения	Давление на образец грунта, МПа	Показания индикатора деформаций опыта, мм	Абс. деформация образца, S, мм	Относит. деформация, ε
2	3	4	5	6	7	8
0	0,000	1		0,000		
0,083	0,083			0,210		
0,170	0,170			0,620		
0,3	0,330			0,790		
0,5	0,5			1,030		
1	1			1,440		
2	2			6,750		
4	4			6,910		
6	6			6,930		
8	8			6,950		
24	24			6,990		
48	48			7,010		
96	96			7,030		
120	120			7,040		
144	144			7,040		
0	144	2		7,040		
0,083	144,083			7,080		
0,170	144,170			7,080		
0,3	144,330			7,080		
0,5	144,5			7,080		
1	145			7,090		
2	146			7,100		
4	148			7,100		
6	150			7,100		
8	152			7,100		

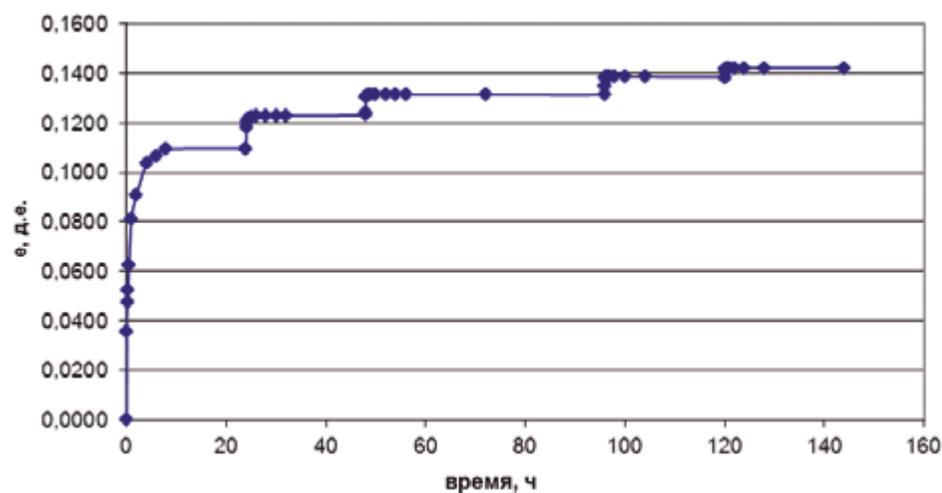
Таблица 3

Время	Время от начала опыта t, час	Номер ступени нагружения	Давление на образец грунта, МПа	Показания индикатора деформаций опыта, мм	Абс. деформация образца, S, мм	Относит. деформация, ε
24	168			7,120		
48	192			7,140		
72	216			7,160		
96	240			7,160		
0	240	3		7,160		
0,083	240,083			7,190		
0,170	240,170			7,190		
0,3	240,330			7,190		
0,5	240,500			7,190		
1	241			7,200		
2	242			7,210		
4	244			7,210		
6	246			7,210		
8	248			7,220		
24	264			7,240		
48	288			7,260		
96	336			7,280		
0	336,000	4		7,280		
0,083	336,083			7,310		
0,170	336,170			7,310		
0,3	336,330			7,310		
0,5	337			7,310		
1	337			7,320		
2	338			7,330		
4	340			7,340		
8	344			7,350		
24	360			7,370		
48	384			7,390		
72	408			7,410		
96	432			7,410		
0	432	5		7,410		
0,083	432,083			7,440		
0,170	432,170			7,440		
0,3	432,330			7,440		
0,5	432,5			7,440		
1	433			7,440		
2	434			7,440		
4	436			7,450		
8	440			7,460		
24	456			7,470		
48	480			7,490		
72	504			7,490		

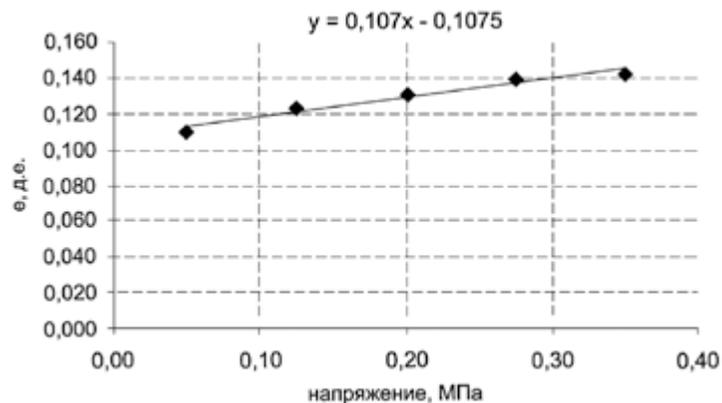
Пример оформления результатов испытаний

Номер скважины:	1
Глубина отбора, м:	2,5
Наименование грунта:	песок пылеватый
Плотность, г/см ³	2
Влажность, %	15,0
Влажность после оттаивания, %	8

Зависимость относительной деформации от времени на каждой ступени нагрузки



Зависимость относительной условно-стабилизированной деформации от напряжения



Результаты расчета деформационных характеристик

№ Ступени	σ , МПа	ε	A , д.е.	m , МПа ⁻¹
1	0,0500	0,1096	0,1075	0,1070
2	0,1250	0,1231		
3	0,2000	0,1314		
4	0,2750	0,1383		
5	0,3500	0,1421		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Ершов Э.Д.* Деформации и напряжения в промерзающих и оттаивающих породах/Э.Д. Ершов – М.: Изд-во МГУ, 1985. – 167 с
- [2] *Ершов Э.Д.* Влагоперенос и криогенные текстуры в дисперсных породах/Э.Д. Ершов – М.: Изд-во МГУ, 1979. – 213 с.
- [3] *Цытович Н.А.* К расчету осадок фундаментов на оттаивающих грунтах/ Н.А. Цытович / Труды ЛИСИ. – 1941. – вып. 3
- [4] *Morgenstern N.R.* Thaw-consolidation tests on remoulded clays/N.R. Morgenstern, L.V. Smith / Canadian Geotechnical Journal – 1973 – Vol. 10 – p. 25–39
- [5] *Qi J.* Influence of freeze-thaw on engineering properties of a silty soil/J. Qi, W. Ma, C Song / Cold Regions Science and Technology. – 2008–53 – p. 397–404.
- [6] *Ершов Э.Д.* Методы определения механических свойств мерзлых грунтов/ Э.Д. Ершов, Л.Т. Роман. – М.: Изд-во МГУ, 1995–161 с.
- [7] *Котов П.И.* Компрессионное деформирование прибрежно-морских мерзлых грунтов при оттаивании (европейский север России, Западная Сибирь). М: автореферат канд. дис., 2014. 23 с.

II.5. Вдавливание шарикового штампа (П.И. Котов)

Метод определения прочности мерзлых грунтов вдавливанием сферического штампа предложен Н.А. Цытовичем [1] на основе аналогии с пробой Бринелля, используемой в металловедении. Он нашел широкое применение в практике исследований и инженерных изысканий благодаря простоте и информативности. В дальнейшем на основании решения А.Ю. Ишлинского [2] о вдавливании сферы в упруго-пластичное полупространство С.С. Вяловым и Н.А. Цытовичем [3] получено уравнение для расчета меняющегося во времени эквивалентного сцепления C_{eq} , которое учитывает влияние на прочность как сцепления, так и трения.

Испытания шариковым штампом проводят для определения сопротивления нормальному давлению R , которое в соответствии с СП 25.13330.2012 [4] определяется по формуле:

$$R = 5,7 C_{eq\infty} + \gamma h, \quad (1)$$

где $C_{eq\infty}$ – предельно-длительное эквивалентное сцепление; γ – удельный вес грунта; h – глубина отбора образца.

Сопротивление нормальному давлению необходимо определять для расчета несущей способности основания F_u , кН, вертикально нагруженной свайей или столбчатого фундамента, которая определяется по формуле:

$$F_u = \gamma_t \gamma_c \left(RA + \sum_{i=1}^n R_{af,i} A_{af,i} \right), \quad (2)$$

где γ_t – температурный коэффициент, учитывающий изменения температуры грунтов основания из-за случайных изменений температуры наружного воздуха;

γ_c – коэффициент условий работы основания;

R – расчетное сопротивление мерзлого грунта под нижним концом сваи или под подошвой столбчатого фундамента, кПа, определяется по формуле (1);

A – площадь подошвы столбчатого фундамента или площадь опирания сваи на грунт, м², принимаемая для сплошных свай равной площади их поперечного сечения (или площади уширения), для полых свай, погруженных с открытым нижним концом, – площади поперечного сечения сваи брутто при заполнении ее полости цементно-песчаным раствором или грунтом на высоту не менее трех диаметров сваи;

$R_{af,i}$ – расчетное сопротивление мерзлого грунта или грунтового раствора сдвигу по боковой поверхности смерзания сваи или столбчатого фундамента в пределах;

$A_{af,i}$ – площадь поверхности смерзания i -го слоя грунта с боковой поверхностью сваи, а для столбчатого фундамента – площадь поверхности смерзания грунта с нижней ступенью фундамента, м²;

n – число выделенных при расчете слоев многолетнемерзлого грунта.

Условия проведения опыта согласно ГОСТ 12248–2010 [5]:

- 1) испытания проводятся на мелких и пылеватых песках (кроме сыпучемерзлых) и глинистых грунтах с содержанием органического вещества не более 10 % ;

- 2) толщина прослоек льда в образце должна быть не более 2 мм, а льдистость $i \leq 0,4$ д.е. (при большей льдистости необходимо увеличение диаметра шарикового штампа и колец);
- 3) температура испытаний должна быть в следующих диапазонах: для незасоленных грунтов от $[T_{bf} + (-0,5)]^{\circ}\text{C}$ до минус 5°C ; для засоленных от $[T_{bf} + (-1,0)]^{\circ}\text{C}$ до минус 8°C , где T_{bf} – температура начала замерзания грунта.
- 4) образцы должны иметь форму цилиндра диаметром не менее 70 мм и высотой не менее 35 мм.

ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ

В состав установки для испытаний мерзлого грунта шариковым штампом должны входить:

- шариковый штамп диаметром (22 ± 2) мм с опорной плитой и подвижным столиком (при большой льдистости необходимо увеличение диаметра шарикового штампа и колец);
- плоский штамп для предварительного обжатия образца грунта;
- рабочее кольцо для отбора грунта;
- механизм для вертикального нагружения образца грунта;
- индикатор деформаций.

Шариковые штампы имеют различные конструкции – рычажная (рис. 1) и с одноштоковым загрузением (рис. 2). Кроме этого, в настоящее время разработан ряд автоматизированных приборов с подачей давления и записью показаний деформаций на компьютер. Такие приборы разработаны компаниями ООО «Криолаб» и ООО НПП «Геотек».

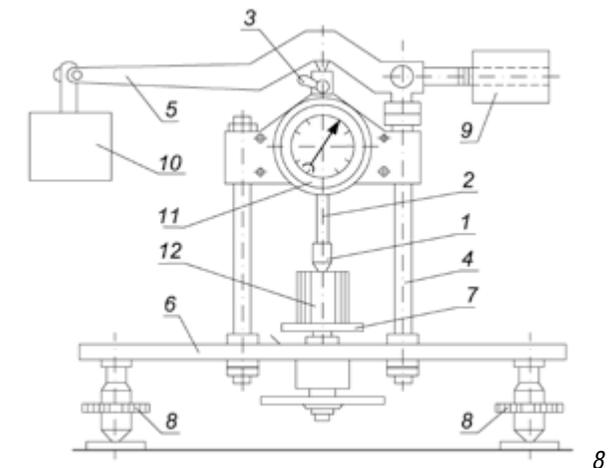


Рис 1. 1 – шариковый штамп; 2 – подвижной стержень с держателем шарика; 3 – ручка стопорного винта; 4 – стойки; 5 – рычажный пресс (с соотношением плеч рычага 5:1); 6 – опорная плита; 7 – подвижной столик; 8 – уравнивательные винты; 9 – контргруз; 10 – гири; 11 – индикатор деформаций; 12 – образец грунта

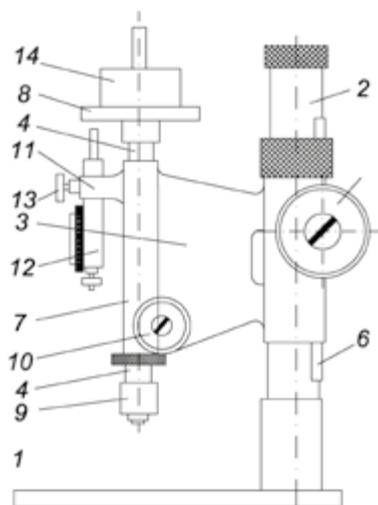


Рис. 2. Одноштоковый сферический штамп конструкции НИС «Гидропроект»: 1 – опорная плита; 2 – направляющая стойка; 3 – консоль; 4 – верхний конец штока; 5 – нивелировочный винт; 6 – зубчатая рейка; 7 – направляющая муфта; 8 – площадка для размещения груза; 9 – шариковый штамп; 10 – стопорный винт; 11 – держатель индикатора; 12 – индикатор для измерения деформаций; 13 – зажимной винт; 14 – груз

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

После изготовления образца грунта его выдерживают в рабочем кольце в течение 12 ч. При температуре испытаний проводят предварительное обжатие образца через плоский штамп давлением, равным напряжению от собственного веса грунта на горизонте отбора образца, в течение 15 с. После обжатия образец разгружают.

Образец грунта в рабочем кольце устанавливают на подвижный столик установки и производят следующие операции:

- покрывают образец защитной пленкой, в которой должно быть вырезано отверстие диаметром, на 2–3 мм превышающим диаметр шарикового штампа;
- устанавливают на образец грунта шариковый штамп и центрируют его, фиксируя момент касания шариком поверхности грунта по показаниям приборов для измерения деформаций образца грунта;
- закрепляют стержень штампа стопорным винтом;
- записывают начальные показания приборов.

При назначении нагрузки должно соблюдаться условие

$$0,005 d < S_{15} < 0,05 d, \quad (3)$$

где S_{15} глубина погружения шарикового штампа в образец грунта через 15 мин после приложения нагрузки, см. При несоблюдении условия (4.5.3) следует произвести корректировку нагрузки.

Для этого условия соответствуют примерные значения постоянной нагрузки на штамп, в зависимости от вида грунта и его состояния (пластично- или твердомерзлого) приведены в таблице 1.

Таблица 1

Примерные нагрузки при испытания шариковым штампом

Грунт	Состояние мерзлого грунта	Нагрузка Р, Н
Мелкие пески и супеси	пластично-мерзлое	40
	твердомерзлое	50
Глина и суглинки	пластично-мерзлое	20
	твердомерзлое	30

После приложения нагрузки снимают отсчеты вертикальной деформации образца грунта через 5, 10, 20, 30 и 60 мин, затем через 2 ч в течение рабочего дня и далее – два раза в сутки до условной стабилизации деформации. За критерий условной стабилизации деформации принимают приращение вертикальной деформации, не превышающее 0,01 мм за 12 ч. В обоснованных случаях может быть проведено испытание в ускоренном режиме продолжительностью 8 ч.

Испытание заканчивают после достижения условной стабилизации глубины погружения шарикового штампа или, если испытание проводят в ускоренном режиме, через 8 ч после начала испытания.

Может быть проведено повторное испытание на том же образце при соблюдении условия: центр следующего погружения шарикового штампа должен отстоять от границ предыдущих отпечатков шарика и от края образца не менее чем на половину диаметра шарика.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

По показаниям индикаторов для измерения деформаций определяют глубину погружения шарикового штампа в грунт в конце испытания (до достижения условной стабилизации деформации или через 8 ч – при ускоренном режиме испытания). Строится график зависимости изменения эквивалентного сцепления во времени (рис. 4).

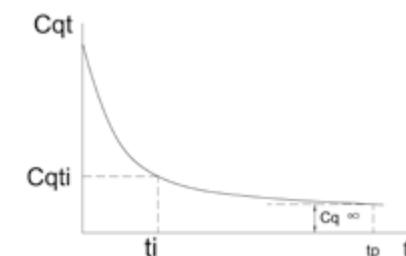


Рис. 4. Зависимость изменения эквивалентного сцепления во времени

Предельно длительное значение эквивалентного сцепления мерзлого грунта C_{eq} , МПа, определяют с точностью 0,01 МПа по формуле

$$C_{eq} = 0,06\kappa \frac{P}{d S_t}, \quad (4)$$

где F – нагрузка на шариковый штамп, кН;

d_b – диаметр шарикового штампа, см;

S_b – глубина погружения шарикового штампа в грунт в конце испытания, см;

k – безразмерный коэффициент, равный 1 при испытаниях до условной стабилизации деформации и 0,8 – при ускоренном режиме.

Как показали исследования [6,7], рекомендованный для твердомерзлых грунтов коэффициент 0,8, снижающий C_{eq} , полученное за 8ч., до предельно-длительного значения ($C_{eq\infty} = k C_{eq}$), справедлив для твердомерзлых грунтов массивной криогенной текстуры, а для грунтов, которые находятся в пластично-номерзлом состоянии, является завышенным. Так, например, для засоленных грунтов коэффициент κ может уменьшаться до 0,4–0,6.

В связи с этим необходимо провести пятикратное определение на каждом образце C_{eq} за 8 – часовой период, а шестое испытание выполнить до условной стабилизации осадки шарика, равной 0,01 мм за 12 часов, по которой рассчитывается $C_{eq\infty}$. Все данные за 8-ми часовой период подвергаются статистической обработке, получаем среднее значение $\overline{C_{eq8}}$. По результатам опыта, выполненного до условной стабилизации осадки, определяется коэффициент k как отношение $C_{eq\infty}$, полученного по значению условно-стабилизированной осадки, к $\overline{C_{eq8}}$. Затем среднее значение $C_{eq\infty}$ для испытанного образца вычисляется:

$$\overline{C_{eq\infty}} = \overline{C_{eq8}} \times k. \quad (5)$$

Следует отметить, что условная стабилизация может наступить через весьма длительный срок – 1,5–2 недели.

Эквивалентное сцепление является информативной характеристикой, которая позволяет определять не только прочностные характеристики. Его величина дает возможность определять следующие характеристики.

- Соппротивление сдвигу мерзлого грунта по грунту R , которое может быть принято равным эквивалентному сцеплению C_{eq} [8].
- Модуль общей деформации на период времени t , E_{ot} определяется по формулам (6–8), на основе анализа трех расчетных схем, рассмотренных применительно к мерзлым грунтам [9,10].

1. Поверхность грунта под шаровым штампом деформируется аналогично ее деформированию под гибким штампом. На основании решения Жемочкина [11] E_{ot} определяется:

$$E_{ot} = \frac{2(1 - \mu^2)P\sqrt{St(d - S_t)}}{\pi d S_t^2}. \quad (6)$$

2. Поверхность грунта под шаровым штампом деформируется как идеально упругое тело. Модуль деформации вычисляется из уравнения вдавливания абсолютно жесткого шара в упругое полупространство [12]:

$$E_{ot} = \frac{3(1 - \mu^2)P}{4r^{1/2} S_t^{3/2}}. \quad (7)$$

3. Шар погружается в грунт. В основу расчета модуля деформации положено уравнение А.Н. Динника [13], при этом радиус отпечатка штампа принимается равным радиусу усеченного сегмента:

$$E_{ot} = \frac{3(1 - \mu_0^2)P}{4S_t^{3/2}(d - S_t)^{1/2}}, \quad (8)$$

μ_0 коэффициент Пуассона; P – нагрузка на штамп; d – диаметр штампа; S_t – осадка штампа за период времени t .

Анализ полученных результатов по формулам (6–8) и их сопоставление с данными определения модуля деформации компрессией и одноосным сжатием показал принципиальную возможность оценки деформации свойств мерзлых грунтов по осадке шарикового штампа. Выбор уравнения обусловлен особенностями проявления реологических свойств различных видов мерзлых грунтов. Так для мерзлого среднезернистого песка более приемлемым оказалось уравнение (7) [14], для засоленных и заторфованных грунтов – уравнение (8) [15].

ВЯЗКОСТЬ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Вязкость отражает способность грунтов сопротивляться перемещению ее структурных элементов относительно друг друга и разрушению в условиях сохранения сплошности.

Особенностью испытаний вдавливанием шарикового штампа является то, что на первом этапе вдавливания шарика напряжения, передаваемые на грунт, самые высокие, интенсивно идет разрушение структуры и интенсивное уплотнение. По мере увеличения отпечатка шарика происходит уменьшение напряжений, снижается скорость деформации, и только на этом участке ползучесть можно условно принять соответствующей представлениям о «шведовой» вязкости. Нами разработан метод построения реологической кривой по данным испытания шариковым штампом в диапазоне проявления грунтами «шведовой» вязкости [16].

С.С. Вяловым [17] отмечено, что метод шарикового штампа для определения вязкости следует использовать только в диапазоне «шведовой» вязкости, определяемой по реологической кривой от σ_k до σ_r . (рис. 5). «Шведова» вязкость при напряжении σ_r будет соответствовать ее минимальному значению, что позволит оценить максимальную ползучесть грунтов. Выполненная нами обработка опытных данных показала, что реологические кривые для грунтов по данным испытаний шариковым штампом можно построить в координатах $S_t - \sigma_t$, где S_t – скорость погружения шарикового штампа, определяемая, как отношение осадки штампа в текущий момент времени к конечному (при условной стабилизации) ко времени опыта, σ_t – напряжение, определяемое либо по площади отпечатка шарика в каждый момент времени при постоянной нагрузке P :

$$\sigma_t = \frac{P}{\pi d S_t}$$

либо по величине эквивалентного сцепления C_{qt} за период времени t : $\sigma_t = C_{qt}/0,18$. Пример реологической кривой, построенной указанным способом, приведен на рис. 5.

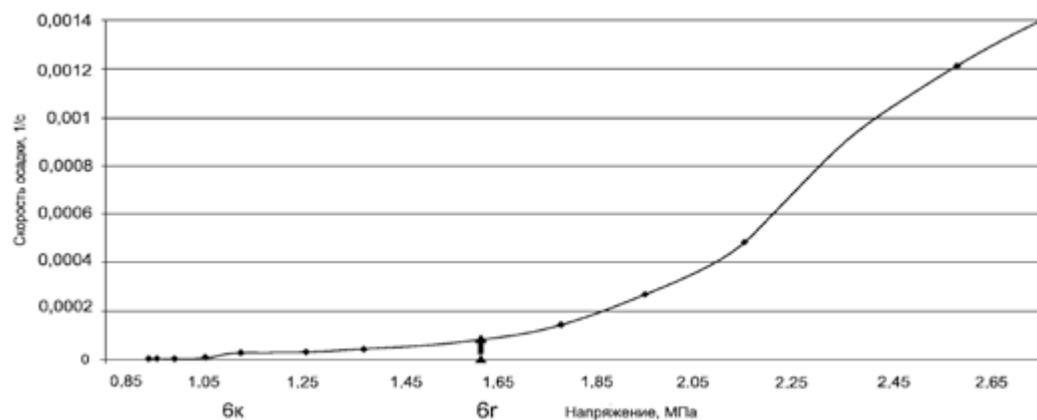


Рис. 5. Пример реологической кривой по данным вдавливания шарикового штампа (суглинок пылеватый, $\rho = 1,87 \text{ г/см}^3$, $W_{tot} = 0,24$, $\theta = -2 \text{ }^\circ\text{C}$)

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Привести описание образца (табл. 2), заполнить журнал испытаний (табл. 3), вычислить эквивалентное сцепление по данным испытаний и рассчитать модуль деформации по формулам (6–8), определить коэффициент вязкости грунтов.

Описание грунта

Номер скважины:	1
Глубина отбора, м:	3
Наименование грунта:	суглинок
Плотность, г/см^3	1,67
Влажность, %	31
Диаметр шарика, см	2,2
Нагрузка, кг	1,2
Температура испытаний, $^\circ\text{C}$	-1

Таблица 2

Таблица 3

Журнал испытаний

Время от начала опыта	Отсчет по датчику деформаций	Глубина погружения шарикового штампа, мм	Значение эквивалентного сцепления, МПа
0	0,000	0,000	
1`	0,200	0,200	
5`	0,220	0,220	
15`	0,280	0,280	
30`	0,420	0,420	
1ч.	0,652	0,652	
2ч.	0,720	0,720	
4ч.	0,750	0,750	
6ч.	0,790	0,790	
8ч.	0,910	0,910	
24ч.	1,012	1,012	
48ч.	1,182	1,182	
72ч.	1,22	1,22	
Предельно-длительное эквивалентное сцепление			
Коэффициент К			

Рассчитать значение длительного эквивалентного сцепления C_{25} на период времени 25 лет по формуле Вялова С.С.

$$C_{25} = \frac{\beta}{\ln \frac{t+t^*}{B}}, \quad (9)$$

где t – время, на которое производится расчет, ч; t^* – единичное время, ч; β и B – параметры, получаемые из опыта на основе обработки данных в координатах $1/C_{qt} - \ln t$ (рис. 6).

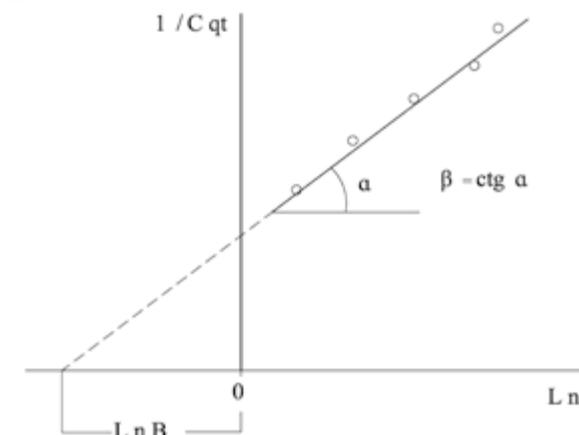


Рис. 6. График для расчета параметров уравнения длительной прочности

Затем в соответствии с СП 25.13330.2012 вычислите значения расчетных давлений (R) по формуле (1) на мерзлый грунт по данным 8-ми часовых и длительных испытаний, а также расчетного длительного эквивалентного сцепления, рассчитанного на 25 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- [1] *Цытович Н.А.* Определение сил сцепления мерзлых грунтов по методу шариковой пробы. Института мерзлотоведения АН СССР. М., 1947.
- [2] *Ишлинский А.Ю.* Осесимметричная задача пластичности и проба Бриннеля М., Л.: Изд-во АН СССР, 1944. Т. 8, вып. 3. С. 201–224.
- [3] *Вялов С.С., Цытович Н.А.* Оценка несущей способности связных грунтов по величине вдавливания сферического штампа. / Докл. АН СССР 1956. Т. 111, № 6. С. 1193–1196
- [4] СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах – М.: ФЦС, 2012. – 52 с.
- [5] ГОСТ 12248–2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – М.: Стандартинформ, 2011. – 109 с.
- [6] *Аксенов В.И.* Засоленные мерзлые грунты Арктического побережья как основание сооружений. М.: Изд-во Все о мире строительства, 2008. 340 с.
- [7] *Роман Л.Т., Царапов М.Н., Кривов Д.Н.* Определение прочности и деформации грунтов вдавливанием сферического штампа. Сергеевские чтения, 2010. С. 398–403.
- [8] *Цытович Н.А.* Механика мерзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 446 с.
- [9] *Роман Л.Т.* Мерзлые торфяные грунты как основания сооружений. Новосибирск: Изд-во АН СССР СО, 1987. 222 с.
- [10] *Роман Л.Т.* Механика мерзлых грунтов. М.: МАИК, 2002. 426 с.
- [11] *Жемочкин Б.Н.* Теория упругости. М.: Госстройиздат, 1957. 137 с.
- [12] *Безухов Н.И.* Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М.: Высшая школа, 1961. 585 с.
- [13] *Динник А.Н.* Сжатие соприкасающихся тел / Изб. труды, т. 1. Киев: Изд-во УССР, 1952.
- [14] *Бадьянова Л.И.* Деформационные свойства песков, намытых в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов. Автореф. дисс. канд. тех. наук. М.: 1985. 24 с.
- [15] *Роман Л.Т., Веретехина Э.Г.* Определение деформационных характеристик мерзлых грунтов вдавливанием шарового штампа / Основания, фундаменты и механика грунтов, № 2. 2004. С. 21–25.
- [16] *Рома Л.Т., Котов П.И.* Вязкость мерзлых грунтов / Криосфера, 4–30. Земли. 2013 35 с.
- [17] *Вялов С.С.* Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.

II.6. Испытания мерзлых грунтов в условия одноосного сжатия (М.Н. Царапов)

1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Исследования показывают, что прочность, определенная при испытании на одноосное сжатие, существенно зависит от отношения длины к диаметру образца и скорости деформирования. На практике применяется отношение $H/D = 2,0–2,5$ [1]. На рис. 1.1 показана схема нагружения образца.

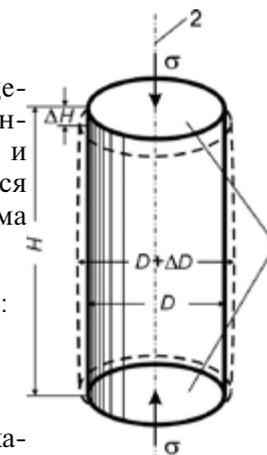


Рис. 1.1. Схема нагружения образца в условиях одноосного сжатия: 1 – контактная площадь образца; 2 – ось симметрии

ЦЕЛЬ ИСПЫТАНИЙ

Испытания мерзлого грунта методом одноосного сжатия проводят для определения следующих характеристик прочности и деформируемости: предела прочности на одноосное сжатие R_c , R_{oc} , модуля линейной деформации E , коэффициента поперечного расширения ν , коэффициента нелинейной деформации A , коэффициента вязкости сильнольдистых грунтов η для песков (кроме гравелистых и крупных) и глинистых грунтов, кроме заторфованных, засоленных и сыпучемерзлых разновидностей указанных грунтов. Эти характеристики определяют по результатам нагружения образцов грунта вертикальной нагрузкой в условиях свободного бокового расширения с доведением образца до хрупкого разрушения или достижения незатухающей ползучести. Для испытаний используют образцы мерзлого грунта ненарушенного сложения с природной влажностью и льдистостью [2].

ОГРАНИЧЕНИЯ

Толщина прослоек льда в образце не должна быть более 2 мм, а льдистость — не превышать 0,4. Шлиры льда должны быть распределены в образце равномерно. Метод применим в диапазоне температур от $T_{bf} + (-1^\circ\text{C})$ до $T = -10^\circ\text{C}$.

УСЛОВИЯ ИСПЫТАНИЙ

Испытания проводятся либо в режиме быстрого нагружения, либо испытание продолжают до тех пор, пока процесс деформирования образца не перейдет в стадию незатухающей ползучести, или относительная продольная деформация образца достигнет 0,2 (длительность испытаний может составлять от 10 до 30 суток).

Мерзлые грунты разрушаются различным образом, в зависимости от значений температуры, давления и засоленности. При низкой температуре и высокой скорости деформирования мерзлые грунты показывают хрупкоупругое поведение.

II. 11. Сдвиг грунта по поверхности модели сваи (С.С. Волохов)

Для определения прочности смерзания грунта R_{af} с моделями свай в лабораторных условиях применяется метод продавливания (или выдерживания) моделей фундаментов, смороженных с грунтом. Для испытания по этому методу используются приборы, разработанные Н.А. Цытовичем и Е.Ф. Ермаковым.

Прибор Цытовича (рис. 1 а) состоит из цилиндрической емкости, представляющей собой кольцо (1), вставленное в поддон (2). В днище поддона имеется круглое отверстие, предназначенное для продавливания цилиндрической стойки из материала фундамента (4). Внутренний диаметр кольца должен быть равен пяти диаметрам стойки. Стойка устанавливается в центре емкости над отверстием в ее днище. Устойчивость и вертикальное положение стойки обеспечивается направляющей трубкой, вмонтированной в центр крестовины, которая накладывается сверху емкости и скрепляется с ней. Отверстие в днище закрывается вкладышем (3).

Прибор Ермакова (рис. 1 б) представляет собой прямоугольный корпус (1) с прорезью в днище. В прорезь устанавливают пластину из материала фундамента (2).

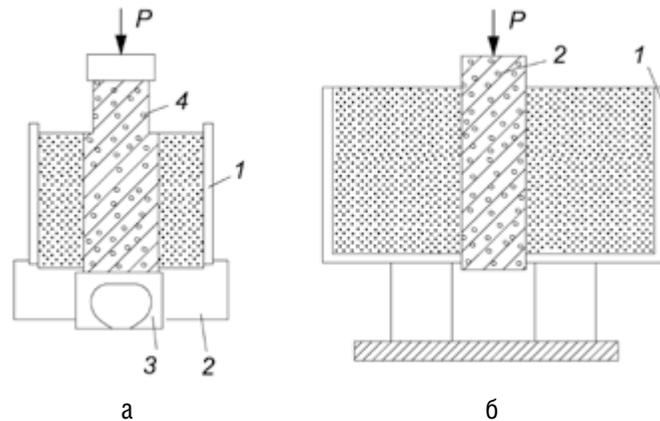


Рис. 1. Схемы приборов для определения прочности смерзания грунта с моделями фундамента: а – прибор Н.А. Цытовича, б – прибор В.Ф. Ермакова

Емкости приборов Цытовича и Ермакова заполняют исследуемым грунтом и проводят замораживание грунта с одновременным смораживанием его с материалом фундамента в требуемом режиме. Во время испытания сдвиговая нагрузка задается путем передачи вертикального давления на стойку (в приборе Цытовича) и пластину (в приборе Ермакова). Нормальная нагрузка моделируется давлением на модель фундамента, возникающем при замерзании грунта. Недостатком приборов Цытовича и Ермакова является невозможность задавать нормальную нагрузку, а следовательно, и разделять сцепление C_{af} и трение по поверхности смерзания f_{af} .

Испытания мерзлых грунтов в приборах Цытовича и Ермакова проводятся статической нагрузкой при постоянном или ступенчатом нагружении по методикам, аналогичным сдвиговым испытаниям на прочность смерзания.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Методы геокриологических исследований. Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 2004. 512 с.
- [2] Методы определения механических свойств мерзлых грунтов. Под ред. Э.Д. Ершова и Л.Т. Роман. М.: Изд-во МГУ, 1995. 160 с.

II.12. Определение деформаций и напряжений пучения при промерзании в закрытой и открытой системе (М.Н. Царапов)

Основной проблемой при строительстве дорог, а также зданий и сооружений на вечномёрзлых и сезонно — промерзающих грунтах являются процессы миграции и пучения грунтов. Напряженно-деформированное состояние грунта при морозном пучении обуславливает недопустимые перемещения и серьезные повреждения промышленно-гражданских зданий, гидротехнических, мелиоративных сооружений, разрушение покрытий автомобильных дорог и аэродромов, искривление рельсо-шпальной решетки железнодорожной колеи, смещение опор мостов, линий электропередач, трубопроводов и других инженерных сооружений. Особенно широко деформации сооружений имеют место в районах глубокого сезонного промерзания грунтов, а также на территории с вечномёрзлыми породами, где в условиях преимущественного распространения сильнопучинистых пылеватых грунтов воздействующие на сооружения силы пучения достигают значительных величин.

Напряженно-деформированное состояние мерзлых грунтов не является стабильным, а претерпевает непрерывные изменения при промерзании и дальнейшем понижении температуры, стремясь к динамическому равновесию.

Основными криогенными процессами, формирующими напряженно-деформированное состояние, являются:

- 1) фазовое превращение воды в лед, сопровождаемое увеличением ее объема ~ на 9%;
- 2) криогенная миграция воды к фронту промерзания в мелкодисперсных грунтах и обезвоживание нижележащих горизонтов;
- 3) напорная миграция воды и грунтовой массы, вызванная отжатием из локально промерзающих участков в менее напряженные талые зоны;
- 4) температурное сокращение всех компонентов промерзающего грунта.

Все перечисленные процессы неоднозначно влияют на формирование напряженно-деформированного состояния. Увеличение объема замерзающей воды и ее миграция к фронту промерзания являются причиной выпучивания. Температурное сокращение всех грунтовых компонентов с понижением температуры и обезвоживание грунта, расположенного под промерзающим слоем, приводит к осадкам.

Необходимость учета и предупреждения воздействий промерзающих морозоопасных грунтов на фундаменты и конструкции зданий и сооружений (что сопряжено с оценкой деформаций и сил морозного пучения) является одним из основных условий обеспечения устойчивости, эксплуатационной пригодности и долговечности сооружений, возводимых в районах сезонного промерзания грунтов.

Морозное пучение — внутриобъемное деформирование промерзающих влажных грунтов, приводящее к увеличению их объема вследствие кристаллизации поровой и мигрирующей воды с образованием кристаллов и линз льда.

Степень пучинистости грунта — показатель пучинистости грунта.

Относительная деформация морозного пучения образца грунта — отношение абсолютной вертикальной деформации морозного пучения промерзающего грунта к мощности промерзшего слоя.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА МОРОЗНОЕ ПУЧЕНИЕ ГРУНТОВ И СИЛЫ ВЫПУЧИВАНИЯ ФУНДАМЕНТОВ

Установлено, что основными факторами определяющими процесс морозного пучения, являются:

- минералогический состав;
- состав обменных катионов;
- гранулометрический состав;
- влажность грунтов и характер увлажнения;
- интенсивность охлаждения;
- скорость и глубина промерзания;
- действующие статистические нагрузки.

ОТБОР И ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ ГРУНТА В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Отбор, упаковка, транспортирование и хранение монолитов и образцов грунта нарушенного сложения должны проводиться в соответствии с требованиями ГОСТ 12071. В случае отбора грунта в мерзлом состоянии его предварительно оттаивают под давлением, равным давлению от собственного веса грунта на горизонте отбора монолита. Размер крупноблочных включений в образце не должен превышать 20 мм. Образец грунта нарушенного сложения вырезают из монолитов с помощью металлической формы, внутренние размеры которой соответствуют размерам образца грунта, методом режущего кольца, приведенным в ГОСТ 5180. С помощью приспособления для выдавливания образец грунта извлекают из формы и помещают в обойму установки для испытаний. Неровности поверхности образца крупнообломочного грунта заполняют материалом заполнителя того же грунта. Образец грунта нарушенного сложения с заданными значениями плотности и влажности приготавливают в обойме методом послойного трамбования или под прессом. Внутреннюю поверхность обоймы смазывают при изготовлении образца тонким слоем технического вазелина или покрывают слоем антифрикционного материала (например, полиэтиленовой или фторопластовой пленкой). Обойму помещают вместе с грунтом в установку для испытаний. Образцы, искусственно приготовленные из глинистого грунта, предварительно промораживают при подтоке воды в промерзающий грунт, затем оттаивают. Число циклов промораживания-оттаивания должно быть не менее двух. Торцевые поверхности образцов должны быть плоскими и параллельными между собой.

ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ

В лабораторных условиях проводится определение следующих показателей пучинистых свойств:

- 1) степень деформаций пучения;
- 2) касательные силы пучения;
- 3) нормальные силы пучения.

До настоящего времени отдельные показатели пучинистых свойств принято было определять в приборах разных конструкции: балочный пресс Далматова – Минина, установка ЦНИИС Минтрансостя, прибор ПНЗ конструкции Д.И. Знаменского.

Практическая необходимость комплексного подхода к изучению процесса пучения и определения основных показателей пучинистых свойств позволило предложить конструкцию собственной универсальной установки. Данная конструкция сочетает в себе возможность измерения деформаций, сил морозного пучения и осадок оттаивающего грунта в заданном температурном и влажностном режимах, а также учитывать зависимость этих параметров от физических свойств грунта и условий промораживания – оттаивания (открытая и закрытая системы). Установка сконструирована с учетом ГОСТ 28622–90 «Метод лабораторного определения степени пучинистости» (рис. 1).

Основным достоинством данной конструкции является то, что она позволяет определять пучинистые свойства одновременно в одинаковых условиях эксперимента, что существенно снижает погрешность опыта. Недостаток установки, как и всех лабораторных приборов, заключается в её габаритах, при которых не учитывается влияние масштабного эффекта.

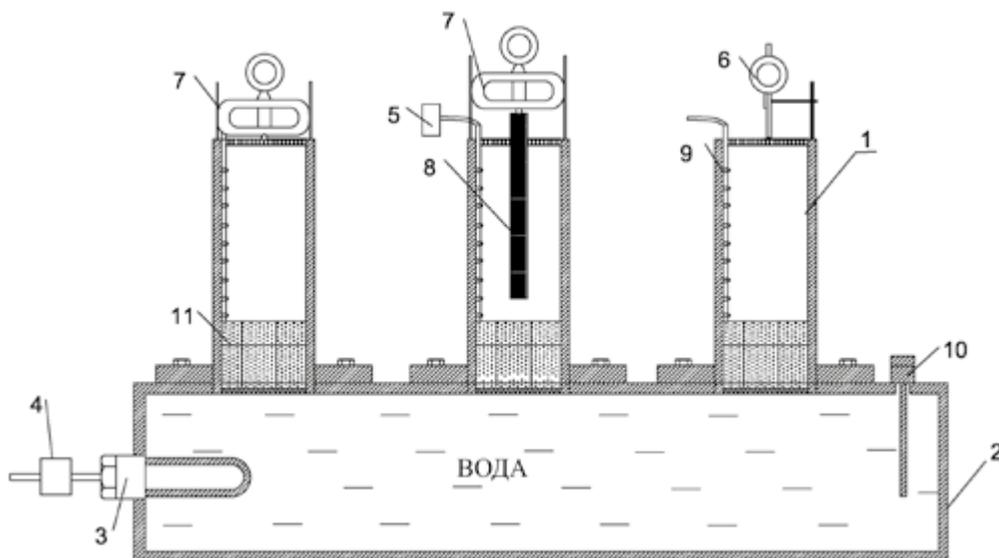


Рис. 1. Конструкция УУОПСГ-1

Лабораторная установка включает:

- обойму для грунта (1);
- поддон, обеспечивающий подток воды при промерзании (2);
- тэн с термореле для регулирования температуры воды в поддоне (3);
- термопреобразователь сопротивления (4);

- прибор, регистрирующий температуру промерзания (5);
- датчик перемещения для замера деформаций пучения (6);
- динамометр для замера нормальных и касательных сил морозного пучения (7);
- модель сваи (8);
- термокоса (9);
- уровнемер (10).

Для обеспечения плоскопараллельного промерзания грунта с поверхности образца стенки обоймы прибора изготовлены из копролона. Экспериментальная установка помещается в холодильную камеру, в которой поддерживается заданный температурный режим промерзания с точностью $\pm 0,10^\circ\text{C}$.

Температура воды в поддоне поддерживается равной $+4,0 \pm 0,10^\circ\text{C}$ с помощью электротэна. Включение и выключение тэна осуществляется термореле. Заданный температурный режим поддерживается следующим образом: когда температура воды опускается ниже заданной, происходило замыкание контактов термореле, что включает в работу тэн. После достижения водой требуемой температуры контакты термореле размыкаются, и тэн выключается.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ПУЧИНИСТОСТИ НА УУОПСГ-1

Степень пучинистости грунта определяется по значению относительной деформации морозного пучения ε_{fh} , полученному по результатам испытаний образцов грунта. Степень пучинистости грунта в зависимости от ε_{fh} приведена в таблице. Испытания проводят на образцах грунта ненарушенного сложения с природной или заданной влажностью или на искусственно приготовленных образцах с заданной плотностью и влажностью, значения которых устанавливаются программой испытаний в зависимости от возможных изменений воднофизических свойств грунта в процессе строительства и эксплуатации сооружения. Испытания проводят не менее чем для трех параллельных образцов исследуемого грунта. Значение ε_{fh} вычисляют как среднее арифметическое результатов параллельных определений. В случае, если разница между параллельными определениями превышает 30%, число определений следует увеличить. В процессе подготовки, проведения и обработки результатов испытаний ведут журнал, форма которого приведена в приложении.

Таблица 1.

Степень пучинистости грунта	Относительная деформация морозного пучения образца грунта
Непучинистый	0,01
Слабопучинистый	$0,01 \leq \varepsilon_{fh} < 0,035$
Среднепучинистый	$0,035 \leq \varepsilon_{fh} < 0,07$
Сильнопучинистый	$0,07 \leq \varepsilon_{fh} < 0,10$
Чрезмернопучинистый	0,10

Относительную деформацию морозного пучения образца грунта ε_{fh} вычисляют с точностью 0,01 по формуле

$$\varepsilon_{fh} = h_f / d_i,$$

где h_f – вертикальная деформация образца грунта в конце испытания, мм; d_i – фактическая толщина промерзшего слоя образца грунта.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАСАТЕЛЬНОЙ СИЛЫ ПУЧЕНИЯ НА УУОПСГ –1

Удельную касательную силу морозного пучения определяют в целях:

- назначения глубины заложения и выбора типа фундаментов зданий и сооружений;
- разработки мероприятий, уменьшающих силы и деформации морозного пучения и исключающих возможность появления недопустимых деформаций оснований и фундаментов.

Удельную касательную силу морозного пучения определяют как отношение измеренной при испытаниях максимальной касательной силы морозного пучения, действующей на образец фундамента, к его боковой поверхности, находящейся в промерзающем грунте.

За максимальную касательную силу морозного пучения принимают наибольшее значение, полученное в результате испытаний образцов фундамента.

Образец фундамента изготавливают в виде железобетонной стойки квадратного сечения 2X2 или 3X3 см, длина образца составляет 15 см.¹

Конструкция установки рассчитана на нагрузку, превышающую на 50% предполагаемую касательную силу морозного пучения.

Образец фундамента погружают на всю глубину гильзы прибора. Верх образца должен выступать над поверхностью грунта не менее чем на 1 см. Обратную засыпку грунта следует выполнять с послойным трамбованием грунта слоями высотой не более 0,1 см.

Снятие показаний динамометров с записывающим устройством производят после промерзания грунта на всю глубину сезонного промерзания-оттаивания.²

Удельную касательную силу морозного пучения τ_{fh} , МПа (кгс/см²), вычисляют по формуле

$$\tau_{fh} = (F + G) / udf,$$

где F – максимальная касательная сила морозного пучения, зарегистрированная показаниями приборов, МН (кгс); u – периметр поперечного сечения образца фундамента, м (см); df – глубина сезонного промерзания (оттаивания) грунта, м (см); G – вес образца фундамента, МН (кгс).

¹ В специальных случаях, определенных программой испытаний, допускается изготавливать образцы фундамента из других материалов (дерево, металл и др.) и другой формы.

² При отсутствии записывающего устройства показания динамометров следует снимать не реже 1 раза в день с начала промерзания грунта. Результаты измерений показания динамометров заносят в журнал, форма которого приведена в рекомендуемом приложении.

Форма журнала испытаний грунта для определения пучинистых свойств

Объект _____
 Номер выработки _____
 Глубина отбора образца _____
 Дата отбора _____
 Лабораторный номер образца _____
 Наименование грунта _____
 Строение грунта _____
 Условия проведения испытаний _____
 Диаметр образца _____
 Высота образца _____
 Площадь образца _____
 Влажность образца _____
 Плотность образца _____

Дата испытания	Время отсчета, ч	Вертикальная нагрузка		Вертикальная деформация пучения, мм	Толщина промерзшего слоя, мм	Относительная деформация пучения, д.е.	Степень пучинистости
		Нагрузка на рычаг, МН, или показание динамометра	Давление в образце F_n/A , МПа				
1	2	3	4	5	6	7	8

Периметр образца фундамента u ,	Глубина погружения образца df , м	Вес образца фундамента G , МН	Сила F , МН (кгс)	$F + G$, МН (кгс)	Удельная касательная сила морозного пучения	Удельная нормальная сила орозного пучения
Руководитель лаборатории Ответственный исполнитель						

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ПУЧИНОСТИ

Бригада 1		
Номер скважины:	437	
Интервал отбора, м:	0,5	
Наименование грунта:	глина мягкопластичная	
Сложение грунта:	нарушенное	
Условия проведения испытаний:	открытая система	
Количество циклов пром-отт.:	2	
Плотность, г/см ³	1,60	
Плотность сухого грунта, г/см ³	1,00	
Влажность, д.е.	0,610	
Диаметр образца, мм	71,4	
Высота образца, мм	86,2	
Площадь образца, см ²	40	
Температура, °С	(-1)-(-5)	
Вертикальная деформация hf, мм	Время отчета от начала опыта, ч	Относительная деформация пучения ε _п , д.е .
0,000	0	
0,560	12	
0,941	24	
1,258	36	
1,890	48	
2,245	60	
2,789	72	
3,125	84	
3,489	96	
2,898	108	
4,560	120	
4,780	132	
4,950	144	
5,120	156	
5,130	168	
Определение касательной силы пучения:		
Температура, °С	Нормальное давление, МПа	Касательная сила пучения, Мпа
-1	0,100	0,180

Бригада 2		
Номер скважины:	425	
Интервал отбора, м:	0,8-1,2	
Наименование грунта:	суглинок твердый	
Сложение грунта:	нарушенное	
Условия проведения испытаний:	открытая система	
Количество циклов пром-отт.:	2	
Плотность, г/см ³	1,98	
Плотность сухого грунта, г/см ³	1,58	
Влажность, д.е.	0,254	
Диаметр образца, мм	71,4	
Высота образца, мм	78	
Площадь образца, см ²	40	
Температура, °С	(-1)-(-5)	
Вертикальная деформация hf, мм	Время отчета от начала опыта, ч	Относительная деформация пучения ε _п , д.е .
0,000	0	
0,560	12	
1,120	24	
1,610	36	
2,050	48	
2,340	60	
2,890	72	
3,250	84	
3,560	96	
3,980	108	
4,250	120	
4,380	132	
4,440	144	
4,510	156	
4,530	168	
Определение касательной силы пучения:		
Температура, °С	Нормальное давление, МПа	Касательная сила пучения, Мпа
-1	0,100	0,225

Бригада 3		
Номер скважины:	490	
Интервал отбора, м:	0,8-1,0	
Наименование грунта:	суглинок мягкопластичный	
Сложение грунта:	нарушенное	
Условия проведения испытаний:	открытая система	
Количество циклов пром-отт.:	2	
Плотность, г/см ³	1,56	
Плотность сухого грунта, г/см ³	1,03	
Влажность, д.е.	0,519	
Диаметр образца, мм	71,4	
Высота образца, мм	71	
Площадь образца, см ²	40	
Температура, °С	(-1)-(-5)	
Вертикальная деформация hf, мм	Время отчета от начала опыта, ч	Относительная деформация пучения ε _п , д.е.
0,000	0	
0,210	12	
0,590	24	
0,850	36	
0,990	48	
1,110	60	
1,250	72	
1,350	84	
1,540	96	
1,680	108	
1,740	120	
1,850	132	
1,920	144	
1,930	156	
1,940	168	
Определение касательной силы пучения:		
Температура, °С	Нормальное давление, МПа	Касательная сила пучения, Мпа
-1	0,100	0,405

РАСЧЕТ ОСНОВАНИЙ И ФУНДАМЕНТОВ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ СИЛ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ

Расчет устойчивости фундамента при действии сил морозного пучения грунтов основания производится в пучиноопасных грунтах в двух случаях: для начальной стадии строительства, когда заложенные фундаменты не нагружены или нагрузка невелика (1–2 этажа); для малоэтажных (1–2 этажа) зданий, когда деформация пучения может происходить и во время эксплуатации объекта (рис.2).

В обоих случаях расчет производится на действие касательных сил пучения по формуле:

$$\tau_{fh} \times A_{fh} - F \leq (\gamma_c / \gamma_n) \times F_r, \quad (2.1)$$

где τ_{fh} – расчетная удельная касательная сила пучения, принимаемая согласно таблице 2.1, кПа; A_{fh} – площадь боковой поверхности фундамента, находящейся в пределах промерзания грунта, м²; F – расчетная нагрузка на фундамент, принимаемая с коэффициентом 0.9 по наиболее невыгодному сочетанию нагрузок и воздействий, включая выдергивающие (ветровые, крановые и т.п.), кН; F_r – расчетное значение силы, удерживающей фундамент от выпучивания, принимаемое по указаниям [17, 26], кН; γ_c – коэффициент условий работы, принимаемый равным 1.0; γ_n – коэффициент надежности, зависящий от назначения сооружения, принимаемый равным 1.1.

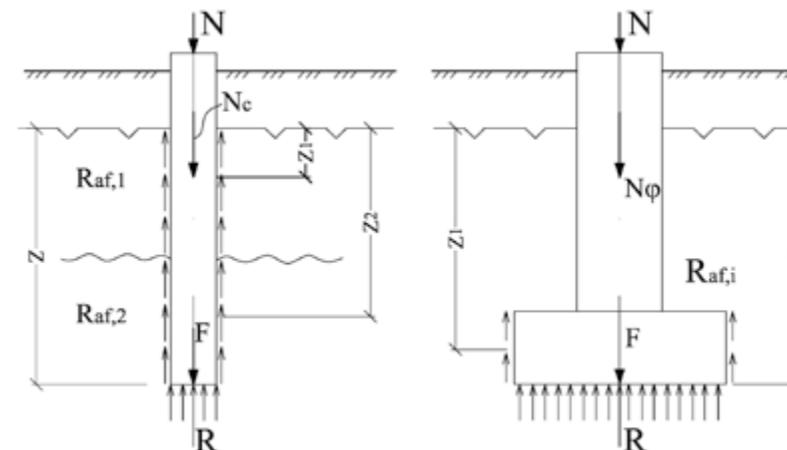


Рис. 2 Расчетные схемы для расчёта устойчивости фундаментов на воздействие касательных сил морозного пучения: а) сваи; б) отдельного столбчатого фундамента

В формуле (2.1) расчетная нагрузка на фундамент определяется из выражения:

$$F = 0,9 (N_0^n + N_\phi^n + N_{GP}^n), \quad (2.2)$$

где N_0^n , N_ϕ^n , N_{GP}^n – нормативные значения нагрузок.

Расчетное значение силы F_r , кН, удерживающей фундамент от выпучивания, следует определять для вечномерзлых и сезоннопромерзающих-оттаивающих грунтов по формуле

$$F = u \sum f_1 h_1, \quad (2.3)$$

где u – периметр сечения поверхности сдвига, м, принимаемый равным для столбчатых и свайных фундаментов без анкерной плиты – периметру сечения фундамента, для столбчатых фундаментов с анкерной плитой – периметру анкерной плиты; h_1 – толщина 1-го слоя талого грунта, расположенного ниже подошвы слоя сезонного промерзания; f_1 – расчетное сопротивление 1-го слоя талого грунта сдвигу по поверхности фундамента, кПа, принимаемое в соответствии с требованиями [17, табл. 2].

Если условие (2.1) не выполняется, то в проекте должны быть предусмотрены мероприятия по защите фундаментов от выпучивания [10].

ЗАДАЧА №1

Требуется проверить устойчивость железобетонной сваи сечением 30*30 см на действие касательных сил пучения при использовании вечномерзлых грунтов по принципу I.

Площадка сложена пылевато-глинистыми грунтами с показателем текучести $IL > 0,5$, температура которых на глубине 10 м $T_0 = -2^\circ\text{C}$. Расчетная глубина сезонного оттаивания грунта $d_{th} = 3$ м. Коэффициент теплопроводности и объемная теплоемкость вечномерзлого грунта равны $\lambda_f = 1,3$ ккал/(м*ч*град), $C_f = 490$ ккал/(м³град). Свая заглублена в грунт на 7 м. На сваю действует постоянная нагрузка 200 кН. Здание с холодным подпольем, свайный фундамент находится под серединой здания. Определяем площадь боковой поверхности смерзания грунта с поверхностью сваи в пределах расчетной глубины сезонного промерзания-оттаивания грунта.

$$A_{oh} = 4 \times 3 \times 0,3 = 3,6 \text{ м}^2$$

Значение расчетной удельной касательной силы пучения при глубине сезонного промерзания-оттаивания 2 м по таблице 4 «Расчетная удельная касательная сила пучения» равно $\tau_{fh} = 110$ кПа.

Таблица 2.1

Расчетная удельная касательная сила пучения

Вид грунта	Значения τ_{fh} , кПа			
	при сливающейся вечной мерзлоте и глубине сезонного оттаивания, м			в условиях сезонного промерзания и несливающейся вечной мерзлоты
	1,0	2,0	3,0	
Супеси, пески мелкие и пылеватые	150	130	110	150
Суглинки	130	120	100	140
Глины, крупно-обломочные грунты с заполнителем глинистым, мелкопесчаным, пылеватым более 10%	110	100	80	110

Согласно СНиП 2.02.04–88 расчетная эквивалентная температура грунта на глубине $Z_d = 7 - 3 = 4$ м составляет $T_e = -1,5^\circ\text{C}$.

Расчетное сопротивление мерзлого глинистого грунта сдвигу по поверхности смерзания определяется по таблице 3 приложения 1 при $T_e = -1,5^\circ\text{C}$ и равно $R_{af} = 130$ кПа.

Расчетное значение силы, удерживающей сваю от выпучивания, равно:

$$R_r = 4 \times 0,3 \times 130 \times 4 = 520 \text{ КПа.}$$

Проверяем устойчивость сваи при коэффициентах $\gamma_n = 1,1$ и $\gamma_c = 1$.

$$110 \times 3,6 - 200 < 1/1,1 \times 520$$

$$196 \text{ кН} < 472 \text{ кН.}$$

Устойчивость сваи на действие сил пучения обеспечивается.

ЗАДАЧА №2

Требуется проверить устойчивость сваи-столба обсыпного устоя моста на действие касательных сил пучения.

Диаметр сваи столба 80 см, длина 8 м с рифленой нижней частью на высоту 4 м. Слой сезонного оттаивания представлен мелким песчаным водонасыщенным грунтом, ниже залегают вечномерзлые сильнольдистые пески. Вечная мерзлота сливающегося типа. Постоянная нагрузка на столб с учетом его собственного веса $F_n = 200$ кН. Расчетная глубина оттаивания грунта $d_{th} = 3,7$ м, глубина заделки столба в вечномерзлый грунт $Z = 3,3$ м. Расчетная толщина снежного покрова у устоя моста $h_{сн} = 0,1$ м. Согласно таблице 2.2 «Значения коэффициента влияния снежного покрова» коэффициент влияния снежного покрова составляет $m_{сн} = 1,0$.

Таблица 2.2

Значения коэффициента влияния снежного покрова

Расчетная толщина снежного покрова $h_{сн}$, м	Коэффициент $m_{сн}$	
	для условий несливающейся вечной мерзлоты	для условий сливающейся вечной мерзлоты
0,1	1,0	1,0
0,2	0,75	0,95
0,4	0,5	0,75
0,6	0,35	0,5

По таблице 2.1 «Значение расчетной удельной касательной силы пучения» значение составляет $\tau_{fh} = 110$ кПа. Площадь смерзания грунта с боковой поверхностью столба:

$$A_{oh} = 3,14 \times 0,8 \times 3,7 = 9,3 \text{ м}^2$$

Расчетная нагрузка на фундамент:

$$F = 200 \times 0,9 = 180 \text{ кН}$$

Расчетное значение силы, удерживающей фундамент от выпучивания, равно:

$$F_r = 3,14 \times 0,8 \times 120 \times 3,3 = 1000 \text{ кН}$$

Расчетное сопротивление мерзлого грунта сдвигу $R_{af} = 120$ кПа.

Проверяем устойчивость столба на выпучивание при $\gamma_n = 1,1$ и $\gamma_c = 1$.

$$110 \times 1,1 \times 9,3 - 180 < 1/1,1 \times 1000.$$

$$840 \text{ кН} < 910 \text{ кН.}$$

Устойчивость сваи-столба обеспечена.

III. Испытания мерзлых грунтов в полевых условиях

III.1. Испытание замороженных свай (Л.Т. Роман, М.Н. Царапов)

Вмороженные сваи являются одним из распространенных типов фундаментов при использовании грунтов оснований в вечномёрзлом состоянии (принцип I, в соответствии с [1]). Полевые испытания проводятся с целью выбора типа свайных фундаментов, технологии установки и определения несущей способности. Они могут выполняться в полевых условиях на стадии инженерных изысканий и в процессе строительства. Количество испытываемых свай на стадии инженерных изысканий определяется в зависимости от мерзлотно-грунтовых условий, а также требований при проектировании конкретных объектов. В зависимости от характера работы свай в мерзлом грунте испытания выполняются статической вдавливающей и выдергивающей нагрузкой.

Испытания на стадии строительства проводятся для контроля соответствия их несущей способности расчетным нагрузкам. Количество свай, подлежащих контрольным испытаниям на каждом объекте, назначается равным 1% от общего количества свай, но не менее двух. Не допускается испытание выдергивающими нагрузками свай, входящих в состав свайного фундамента. Схема оборудования при выполнении испытаний вмороженных свай приведена на рис. 1, 2. Все конструкции установки должны быть рассчитаны на нагрузку, превышающую на 20% наибольшую, заданную программой испытаний.

При испытании нагрузка на сваю должна передаваться центрально и соосно. Расстояние в осях от испытываемой сваи до анкерной или до ближайшей опоры грузовой платформы должно быть не менее трех наибольших размеров поперечного сечения сваи. Температурная скважина устанавливается на расстоянии не более 1 м от оси сваи. Измерение перемещений сваи в процессе испытания выполняется индикаторами, прогибомерами или приборами автоматической записи. Погрешность этих приборов не должна превышать 0.1 мм. Число измерительных приборов должно быть не менее двух. Они устанавливаются симметрично на равных расстояниях от испытываемой сваи. Замеры температуры выполняются заленивленными термометрами или терморезисторами с точностью $\pm 0.1^\circ\text{C}$ через 1.0 м по глубине с обязательным замером температуры на уровне торца сваи. Глубина погружения в грунт термометрических устройств должна быть не менее глубины погружения сваи. Нагрузка задается, как правило, с помощью гидравлических домкратов, упирающихся в жесткую систему балок, закрепленную на анкерах.

В период испытания должно быть исключено смерзание свай от поверхности грунта до границы слоя сезонного оттаивания — промерзания. Для этого выполняются специальные мероприятия: проходка шурфа или бурение скважины размерами, большими максимального размера поперечного сечения сваи, с заполнением зазоров между сваями и грунтом теплоизоляционным материалом.

Обязательные требования к испытаниям изложены в [2]. Основные из них сводятся к следующему. Испытания буроопускных и забивных свай начинаются не ранее чем через неделю после их устройства, буронабивных — не ранее достижения бетоном свай 80%-ой проектной прочности.

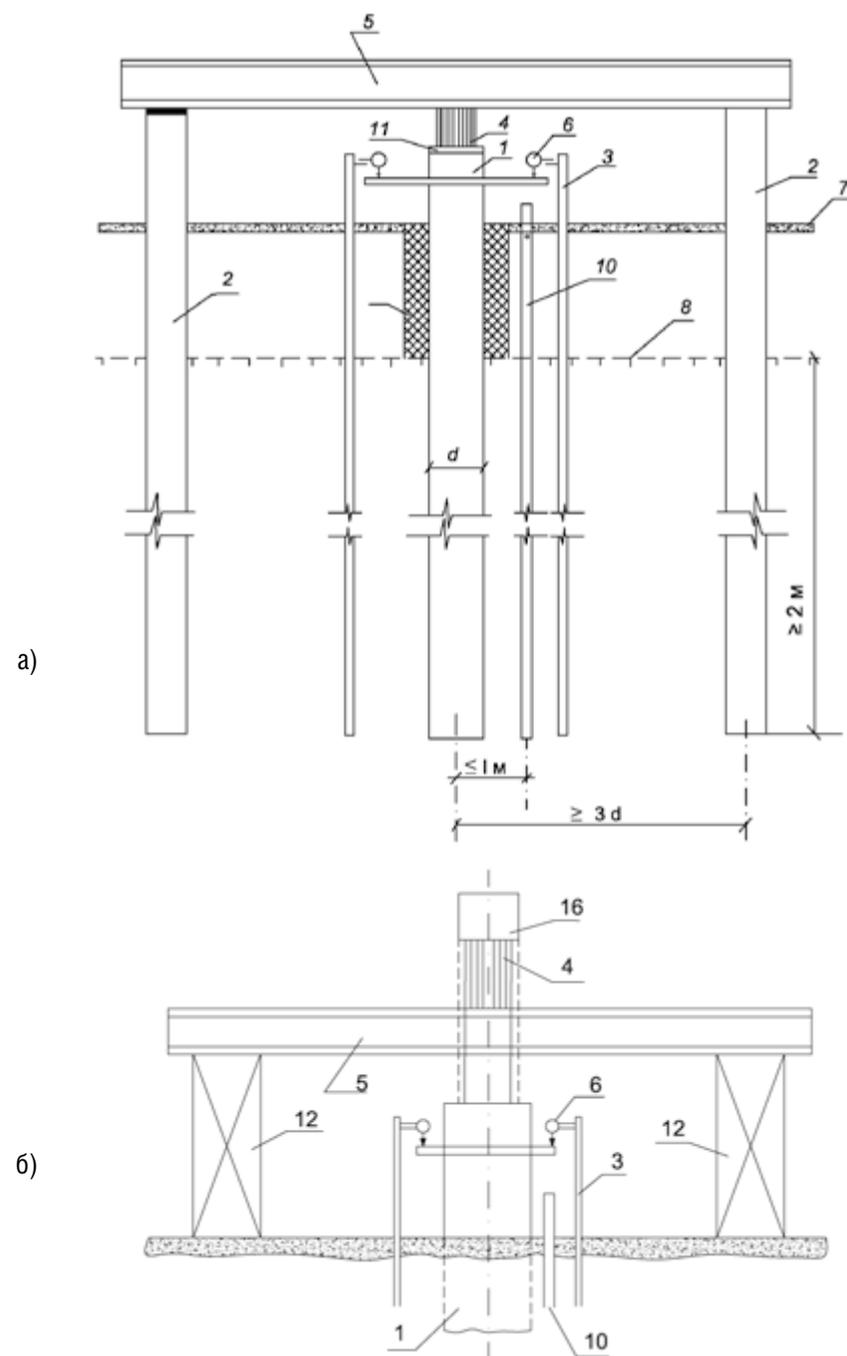


Рис. 1. Схемы установки для испытания сваи вдавливающей (а) и выдергивающей (б) нагрузкой: 1 – испытываемая свая; 2 – анкерные сваи; 3 – анкер для замера деформаций; 4 – домкрат; 5 – жесткая балка; 6 – прогибомер; 7 – дневная поверхность грунта; 8 – граница сезонного оттаивания; 9 – изоляция для предотвращения промерзания; 10 – термометрическая скважина; 11 – жесткая пластина; 12 – подставка для балки 5; 16 – упор

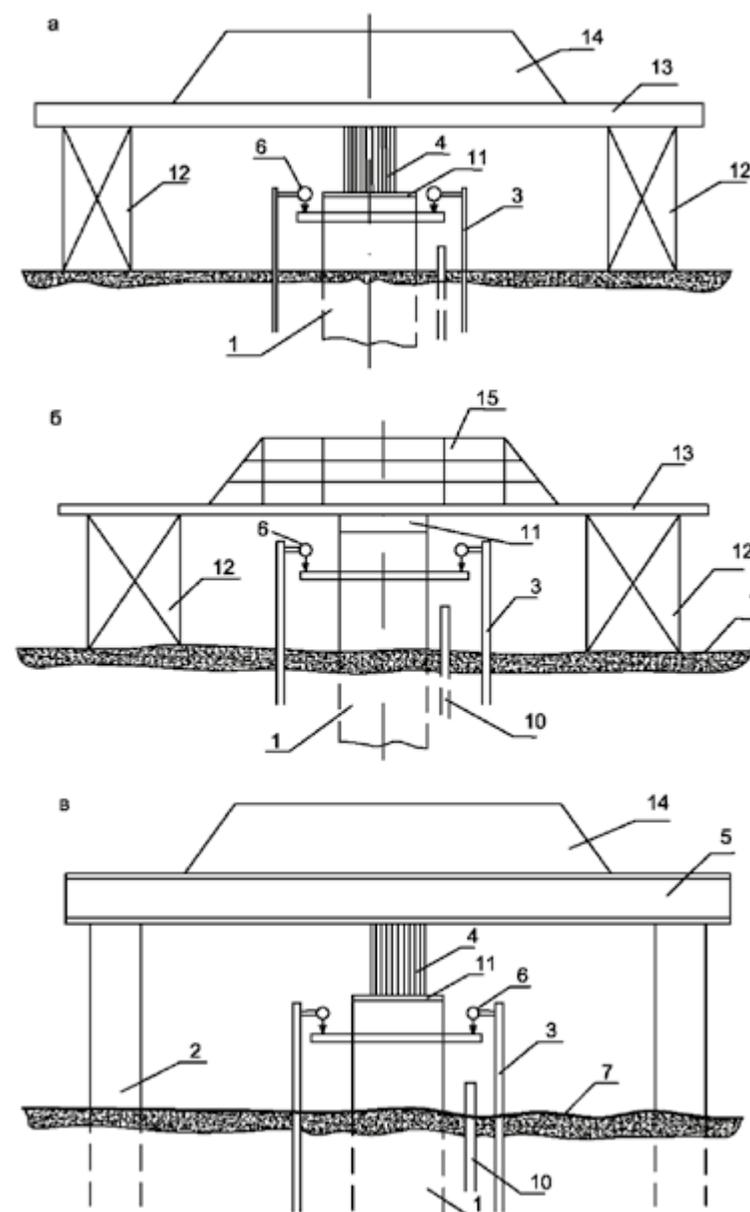


Рис. 2. Варианты схем загрузки испытываемой сваи: а – грузовой платформой; б – тарировочным грузом; в – комбинированным способом (обозначения 1–12, см. рис. 1), 13 – платформа; 14 – груз; 15 – пригрузка

К началу испытаний следует приступать только после полного смерзания сваи с окружающим грунтом. Средняя температура по рабочей длине сваи не должна быть выше температуры окружающего грунта. Проведение испытаний осуществляется ступенчатыми нагрузками, значения которых принимаются равными при первых трех ступенях не более $1/5$ и не более $1/10$ при последующих ступенях от наибольшей нагрузки на сваю. На каждой ступени измерения

деформаций: нулевой отсчет – перед нагружением сваи, первый отсчет – сразу после приложения нагрузки, затем через 0.5; 1; 2; 4; 8; 16 и 24 ч и далее с интервалом 24 ч. Каждую ступень выдерживают до условной стабилизации деформации (осадки, выхода) сваи, но не менее 24 часа. За критерий условной стабилизации деформации принимают скорость осадки (выхода) сваи на каждой ступени нагружения, не превышающую 0.2 мм за последние 24 ч наблюдений. Нагрузка доводится до значений, при которых не происходит условной стабилизации деформации. Испытания заканчивают после того, когда на данной ступени осадка (выход) не менее чем в три раза превысит таковые на предыдущей ступени. Разгрузку сваи производят ступенями, равными удвоенным значениям ступеней нагрузки. Продолжительность ступени разгрузки принимается не менее 15 мин. После разгрузки проводятся измерения упругих перемещений через 15 мин.

В процессе испытаний проводятся регулярные замеры температуры в околосвайном пространстве не реже одного раза в неделю, а также перед началом испытания и сразу после его окончания.

В процессе испытаний оформляется журнал, который включает (рис.3 ...6):

- паспорт;
- схемы испытательной установки, расположения приборов для измерения перемещений сваи и температуры грунта с указанием плана и инженерно-геокриологического разреза ;
- журнал перемещений сваи и замеров температуры;
- графики изменения величин осадки.

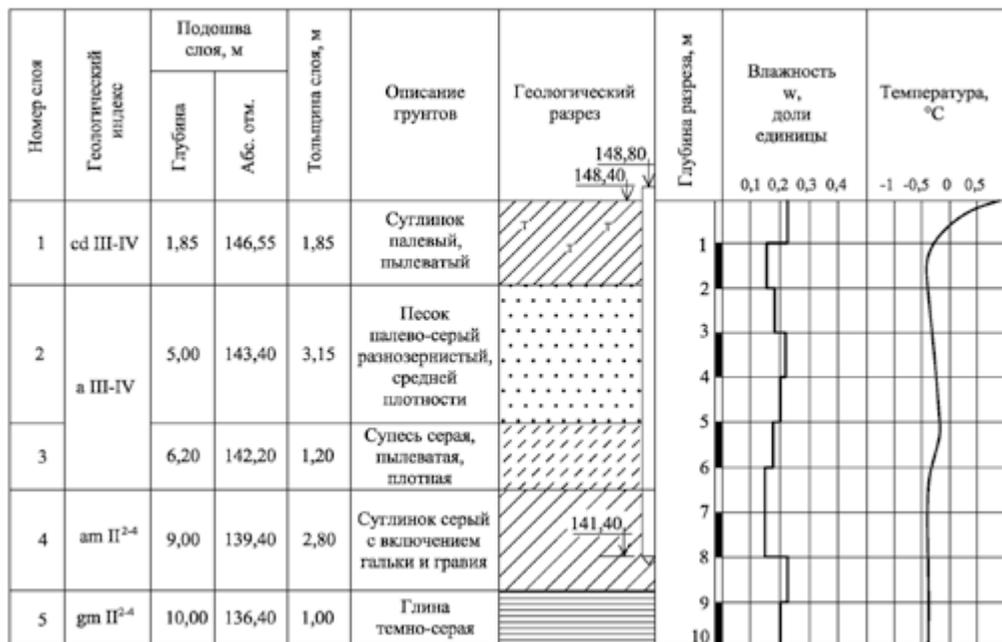


Рис. 3. Пример графического оформления инженерно-геокриологического разреза для полевых испытаний многолетнемерзлых грунтов сваями

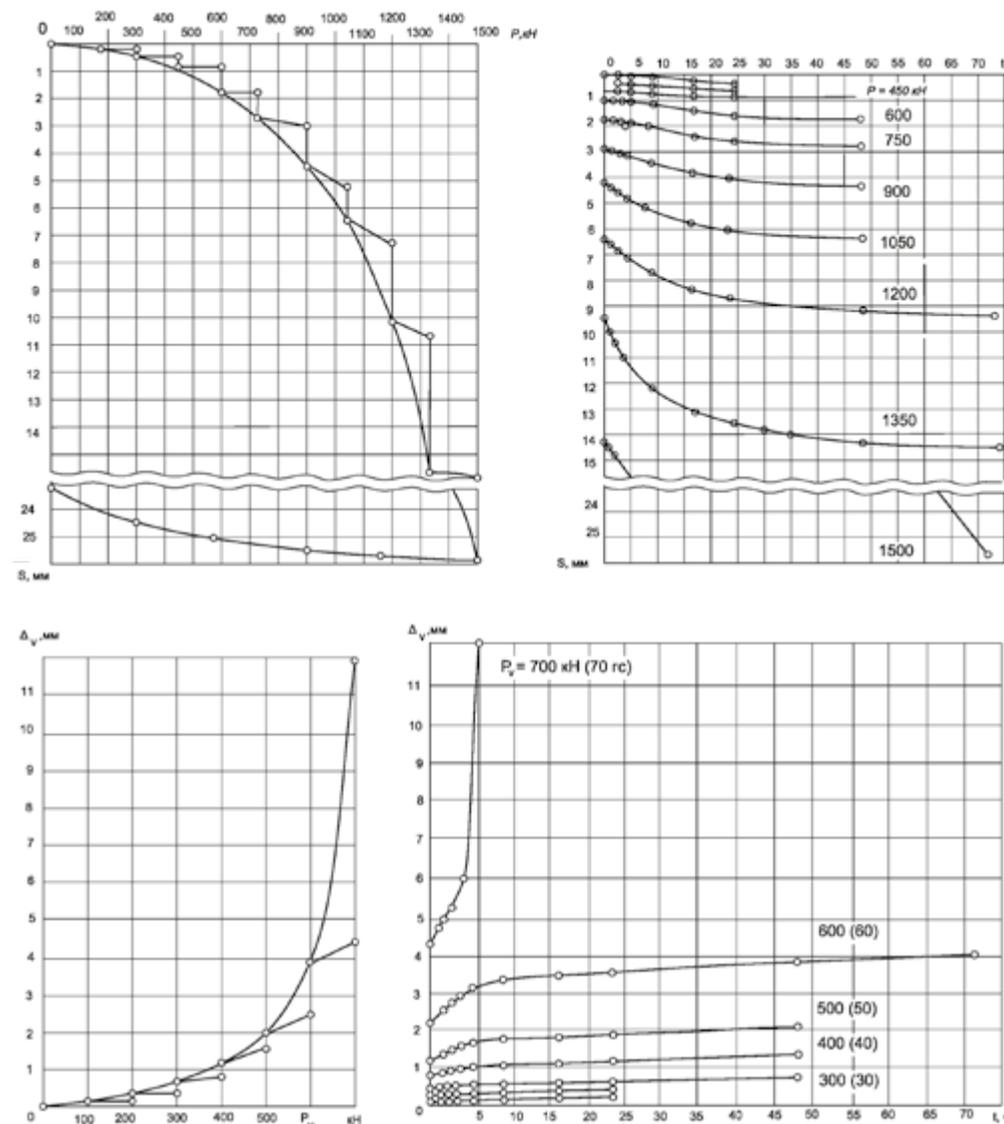


Рис. 4. Пример графического оформления результатов испытания свай вдавливающей (верхний) и выдергивающей (нижний) нагрузкой

За нормативное значение предельно-длительного сопротивления основания сваи статической нагрузке по результатам полевых испытаний ($F_{u, n}$) при которой происходит условная стабилизация осадки (выхода) сваи. При определении расчетной несущей способности следует учитывать ее зависимость от температуры, если испытания выполнялись при температуре ниже или выше ее расчетного значения.

Журнал полевого испытания многолетнемерзлых грунтов
статическими вдавливающими и выдергивающими нагрузками ""

Организация _____ Пункт _____
Объект _____ Сооружение _____

ЖУРНАЛ

полевого испытания многолетнемерзлых грунтов статическими вдавливающими и
выдергивающими нагрузками

Дата испытания: начало "___" _____ 20__ г.

окончание "___" _____ 20__ г.

Свая № _____ Дата погружения сваи
"___" _____ 20__ г.
Вид сваи _____ Способ погружения или устройства
Материал сваи _____
Дата изготовления сваи _____
Сечение (диаметр) сваи на верхнем и нижнем
концах _____ см Оборудование, применявшееся для бурения
скважин и погружения (устройства) сваи
Длина сваи (без острия) _____ м
Длина острия _____ м Лидерная скважина:
Масса сваи _____ т – диаметр _____ см
Способ исключения сезонного смерзания – глубина _____ м
рунта со сваей – способ проходки _____
Ближайшая геологическая выработка Абсолютные отметки:
_____ № – головы сваи после погружения _____ м
пройдено "___" _____ 20__ г. – головы сваи перед испытанием _____ м
Расстояние выработки от сваи _____ м – нижнего конца сваи _____ м
Краткая характеристика инженерно-геокри- – забоя лидерной скважины _____ м
ологического разреза в месте расположения – поверхности грунта у сваи _____ м
сваи _____ – верхней границы многолетнемерзлых
_____ грунтов _____ м
Время погружения сваи _____ мин Состояние головы сваи после погружения
Продолжительность вмерзания сваи (забивки) _____
_____ сут Глубина погружения сваи
Тип приборов для измерения: – общая _____ м
перемещения сваи _____ – ниже максимального сезонного промерза-
_____ ния – оттаивания промерзания – оттаивания
_____ мм
температура грунта _____ – ниже верхней границы многолетнемерзлых
_____ грунтов _____ мм
_____ – ниже забоя скважины _____ м

(Форма последующих страниц журнала)

Объект _____ Испытание № _____ Страница № _____

Дата	Время, ч (мин)	Интервал времени между отсчетами ΔT , мин	Общая нагрузка, кН	Отсчеты по приборам, мм			$S_1 + S_1 + \dots + S_n$, мм	Перемещение $S = (S_1 + S_1 + \dots + S_n) / n^*$, мм	Приращение перемещений ΔS , мм	Сумма перемещений ΣS , мм	Суммарное время ΣT , мин	Примечание
				по первому S_1	по второму S_2	S_n						

* – число приборов.

Дата измерения	Температура грунта, °С, на глубине $h_1(h^*)$, м							
	в слое сезонного промерзания – оттаивания				в многолетнемерзлом грунте			
	h_1	h_2	...	h_n	h_1	h_2	...	h_n (на глубине расположения нижнего конца сваи)

(Форма последней страницы журнала)

Домкрат № _____ на _____ кН; Манометр № _____ на _____ МПа (атм)

Площадь плунжера _____ см

Цена деления манометра _____ МПа (атм)

Номер ступени нагрузки	Степень нагрузки, кН	Общая нагрузка, кН	Показания манометра, кН	Температура многолетнемерзлого грунта, °С	
				на отметке низа сваи	средняя по длине сваи
1					
2					
...					
*					

В журнале пронумеровано _____ страниц, заполнено _____ страниц

Начальник полевого подразделения _____

подпись

(фамилия, инициалы)

Наблюдатели _____

подпись

(фамилия, инициалы)

Рис. 5-6. Журнал полевого испытания многолетнемерзлых грунтов сваями вдавливающей и выдергивающей нагрузками

В этом случае расчетная несущая способность сваи F_u определяется по формуле:

$$F_u = \gamma_t K F_{un} / \gamma_g,$$

где γ_t – температурный коэффициент; K – коэффициент учитывающий различие в условиях опытных и проектируемых свай, равный:

$$K = F_{up} / F_{ut},$$

где F_{up} – несущая способность сваи при расчетной температуре; F_{ut} – несущая способность опытной сваи при температуре, измеренной в процессе испытаний. Значения F_{up} , F_{ut} и γ_t рассчитываются в соответствии с [1]; γ_g – коэффициент надежности по грунту, принимаемый равным 1.1.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах.
- [2] ГОСТ 5686–2012. Грунты. Методы полевых испытаний сваями. М.: Стандартинформ, 2014. 42 с.
- [3] Методы определения механических свойств мерзлых грунтов. М.: Изд-во, МГУ, 1995. 161 с.

III.2. Испытание горячим штампом (П.И. Котов, М.Н. Царапов)

Деформационные характеристики оттаивающих грунтов (коэффициенты оттаивания (A) и сжимаемости (m)) оттаивающего грунта при строительстве ответственных объектов надлежит устанавливать по результатам полевых испытаний мерзлых грунтов горячим штампом по методике ГОСТ 20276–2012. Но этот метод является достаточно трудоемким и дорогостоящим, поэтому в практике инженерно-геокриологическим испытаний преобладают лабораторные испытания, рассмотренные выше. К настоящему времени накоплено незначительное количество данных, позволяющих сравнивать значения деформационных характеристик, полученных в компрессионных и полевых условиях. При этом стоит отметить, что имеющиеся данные были получены в полевых условиях при различных условиях проведения испытаний. Так, в работах В.П. Ушкалова, П.Д. Бондарева, Г.В. Порхаева испытания проводились до предельного значения глубины оттаивания, а в работах Г.И. Пахомовой, В.В. Докучаева, В.А. Сорокина Ю.Г. Федосеева, В.Д. Пономарева, А.А. Колесова, А.И. Золотаря, Хрусталева Л.Н. при оттаивании на 1/2 диаметра штампа с обогревающим кольцом, равным 1/3 диаметра штампа. Сравнение данных деформационных характеристик, полученных в полевых и лабораторных условиях, представлены в таблице 1 [1].

Таблица 1
Сравнение деформационных характеристик оттаивающих грунтов, определенных в лабораторных компрессионных и полевых условиях горячими штампами

Автор	Район	Грунт	$A_K/A_{Ш}$	$m_K/m_{Ш}$
П.Д. Бондарев	Салехард	глинистый	–	1,4–3,0
Г.В. Порхаев	Воркута	глинистый		1,3–1,8
В.П. Ушкалов	Забайкалье	глинистый	1,1–1,5	1,1–1,3
В.В. Докучаев	–	песок	5,0	–
В.Д. Пономарев	–	глинистый	10,0	–
Л.Н. Хрусталев	Воркута	суглинок	1,8–2,0	1,2–1,3
		песок	1,1–1,3	1,0–1,2
В.А. Сорокин	Воркута	глинистый	1,1–3,0	1,3–5,0
		песок	1,0–2,0	1,4–2,7
А.А. Колесов	Западная Сибирь	песок	1,0–1,1	1,0–1,1
А.И. Золотарь	Новый Уренгой	глинистый	20,0	2,4
Г.И. Пахомова	Усть-Илим	суглинок	1,1–1,2	1,1–1,2

Примечание. $A_k/A_{ш}$ — отношение коэффициентов оттаивания, определенных в лабораторных условиях (A_k) и полевых ($A_{ш}$); $m_k/m_{ш}$ — отношение коэффициентов сжимаемости, определенных в лабораторных условиях (m_k) и полевых ($m_{ш}$)

Таким образом, можно сделать вывод, что коэффициенты сжимаемости, полученные в лабораторных условиях, могут быть как одинаковы, так и больше примерно в 3 раза по сравнению с полевыми. Совпадение значений m_k и $m_{ш}$ чаще всего наблюдается в песчаных грунтах.

Коэффициент оттаивания, полученный в лабораторных условиях A_k , больше $A_{ш}$ в 2–20 раз. На значения деформационных характеристик в значительной степени влияет криогенное строение, влажность, льдистость, размеры, различные неоднородности массива, поэтому очень сложно выявить влияние вида испытаний и предложить какие-либо переходные коэффициенты от лабораторных данных к их полевым значениям, как это применяется для талых грунтов.

ОБОРУДОВАНИЕ

В состав установки для испытания грунта горячим штампом должны входить:

- штамп с внутренним обогревом;
- обогревающее устройство;
- устройство для создания и измерения нагрузки на штамп;
- устройства для измерения осадок штампа и температуры грунта;
- насос для откачки воды.

Конструкция установки должна обеспечивать:

- нагружение штампа ступенями давления по 0,01–0,1 МПа;
- центрированную передачу нагрузки на штамп;
- постоянство давления на каждой ступени нагружения;
- исключение продольного изгиба труб-штанг (крепление труб-штанг при большой глубине испытаний по четырем направлениям).

Штамп должен быть жестким, круглым и плоским со сплошной подошвой площадью $F = 5000 \text{ см}^2$.

Конструкция штампа должна обеспечивать равномерный нагрев его дна электронагревателями или горячей водой до температуры не более 90°C .

Обогревающее устройство должно быть расположено по периметру штампа (шириной 0,3 его диаметра) и должно обеспечивать равномерное оттаивание грунта под штампом. При испытании грунтов с естественной влажностью выше влажности на границе текучести должна быть предусмотрена пригрузка обогревающего устройства, соответствующая вертикальному нормальному напряжению от собственного веса грунта на отметке испытания. Схема установки изображена на рис. 1.

В настоящее время ЗАО «Геотест» разработан автоматизированный прибор для проведения испытаний горячим штампом. Его схема представлена на рис. 2. К нижней поверхности штампа жестко закреплена тепловая плита, внутри которой расположен кольцевой нагревательный элемент, выполненный в виде плоской спирали из медной трубки, по которой циркулирует теплоноситель.

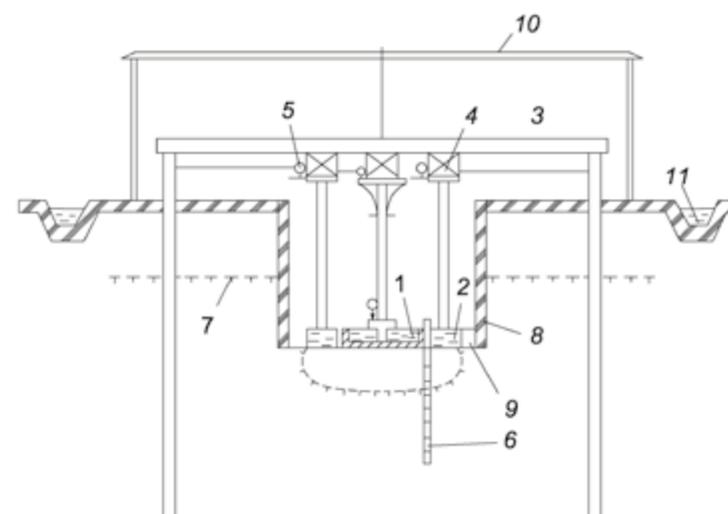


Рис.1. Схема установки для испытаний мерзлых грунтов горячим штампом:
1 – горячий штамп; 2 – обогреваемое кольцо; 3 – балка; 4 – домкраты; 5 – прогибомеры;
6 – термометрическая скважина; 7 – граница сезонного оттаивания;
8 – крепление шурфа; 9 – насос для откачки воды;
10 – навес; 11 – водоотводная траншея

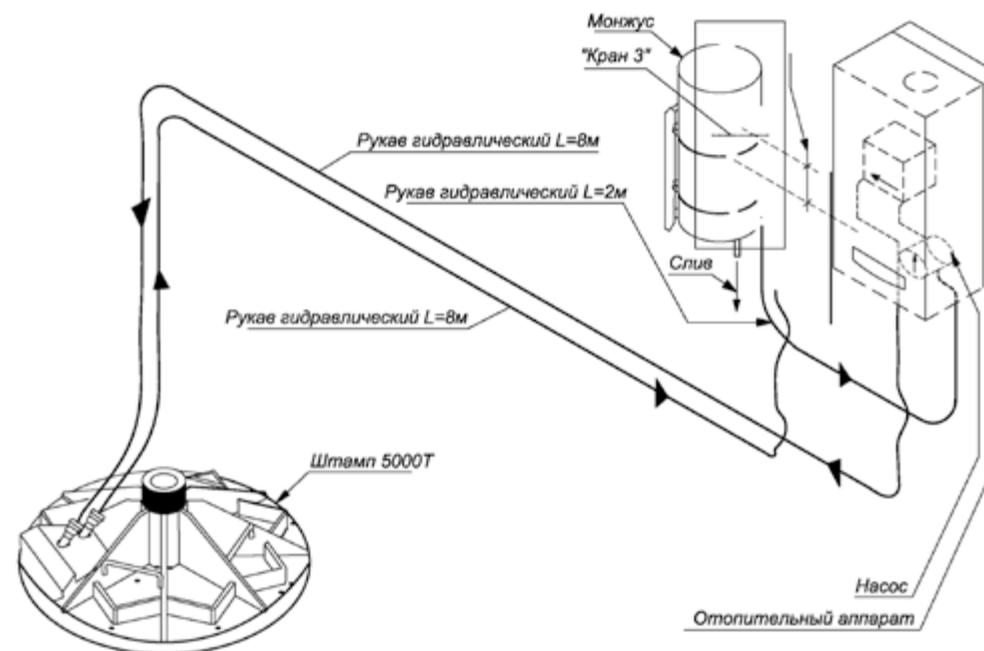


Рис.2. Схема установки для испытаний мерзлых грунтов горячим штампом (конструкция ЗАО «Геотест»)

В качестве устройства для нагрева теплоносителя используется отопительный котел газового или электрического типа, который обеспечивает циркуляцию теплоносителя.

куляцию и нагрев теплоносителя до заданной температуры. Котел соединен со штампом рукавами длиной 8 метров. Монжус предназначен для хранения теплоносителя, заправки системы и создания избыточного давления, необходимого для работы оборудования. Для нормального функционирования оборудования отопительный котел, монжус и газовый баллон стационарно размещают в теплом вагончике, который устанавливается вблизи места испытания.

Для испытаний мерзлого грунта в шурфе на поверхность мерзлого грунта устанавливают штамп, монтируют силовую и реперную системы. Вблизи места испытания располагают вагончик с оборудованием и собирают гидросистему штампа. Затем выполняют операции заполнения гидросистемы и запускают отопительный котел.

ПОДГОТОВКА К ИСПЫТАНИЮ

На подготовленный забой горной выработки по ее центру или непосредственно на поверхность грунта устанавливают штамп с внутренним обогревом, монтируют устройство для нагружения штампа, реперную систему с приборами для измерения осадок штампа. Поверхность в пределах площади установки штампа должна быть зачищена до ненарушенного мерзлого грунта и тщательно спланирована. Для достижения плотного контакта подошвы штампа с грунтом под штамп устраивают подушку из маловлажного песка средней крупности толщиной не более 1–2 см для глинистых и не более 5 см – для крупнообломочных грунтов.

Контроль глубины оттаивания грунта под штампом проводят с помощью температурных датчиков и металлического щупа. Температурные датчики устанавливают с интервалом в 10 см в 2 скважины диаметром 3–4 см и глубиной до 80 см, пробуренные по краям штампа. Скважины необходимо тщательно гидроизолировать охлажденным глинистым грунтом.

Перед началом испытаний для достижения полного контакта штампа с грунтом, обжатия всех конструктивных элементов установки и для исключения разуплотнения мерзлого грунта следует приложить на штамп (без включения его обогрева) нагрузку обжатия, соответствующую вертикальному нормальному напряжению от собственного веса грунта $\sigma_{zg,0}$ на отметке испытания (с учетом собственного веса штампа и деталей установки, не сбалансированных противовесом), но не менее 0,05 МПа. Нагрузку следует выдерживать до условной стабилизации деформации грунта (осадки штампа). Затем (без сброса нагрузки обжатия) устанавливают показания приборов на нулевые деления.

ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЯ

Испытание выполняют в два этапа:

Этап I – создание под штампом зоны оттаявшего грунта на глубину 0,5 диаметра штампа под давлением p , соответствующем напряжению $\sigma_{zg,0}$ на отметке испытания (в первую ступень давления включают вес штампа и деталей установки, не сбалансированных противовесами).

На 1-м этапе испытаний включают обогрев штампа с помощью обогревающего устройства. Обогрев штампа производят до тех пор, пока глубина оттаивания под штампом не станет равной 25–30 см. После этого обогрев прекращают,

и дальнейшее оттаивание грунта до глубины 0,5 диаметра штампа (примерно 40 см) происходит за счет запаса тепла в оттаявшем слое.

При понижении температуры грунта на глубине 40 см ниже 0°C следует производить кратковременный обогрев штампа, обеспечивающий поддержание оттаивания грунта под штампом в течение испытания до глубины, равной 0,5 диаметра штампа.

Этап II – уплотнение оттаявшего грунта ступенчато-возрастающей нагрузкой. Общее количество ступеней давления должно быть не менее пяти. Значения ступени давления на штамп на 2-м этапе испытаний следует принимать: для песков и глинистых грунтов – 0,05 МПа, для крупнообломочных грунтов – 0,1 МПа, для сильновыветрелых скальных грунтов – 0,2 МПа.

Каждую ступень давления выдерживают до условной стабилизации деформации грунта (осадки штампа). За критерий условной стабилизации деформации принимают скорость осадки штампа, не превышающую 0,1 мм за 2 ч для глинистых грунтов и 0,1 мм за 1 ч – для песков, крупнообломочных и сильно-выветрелых скальных грунтов.

Отсчеты по температурным датчикам необходимо производить на 1-м этапе испытания сначала через каждый час, а по мере приближения границы оттаивания к глубине 40 см – через каждые 15 мин. На 2-м этапе испытания отсчеты по температурным датчикам снимают один раз перед приложением очередной ступени давления.

Таблица 2

Журнал испытаний оттаивающих грунтов

Отметка испытания на глубине, м	Дата	Глубина проведения испытания, м	Время проведения испытания t , ч	Интервал времени Δt , мин	Показания манометра, МПа	Нагрузка на штамп, кН	Давление p по подошве штампа, МПа	Показание датчиков деформаций, мм			Среднее значение осадки, мм	Глубина протаивания под штампом (по часе оттаивания) H , мм		Относительная осадка штампа
								S_1'	S_2'	S_3'		S^*	СМ. **	
														$\delta = S/H$

Примечание: * $S = (S_1 + S_2 + S_3)/3$; ** Нц под центром H_1, H_2, H_3, H_4 – под краями; *** Принятая в расчет H ;

Замеры глубины оттаивания грунта металлическим щупом следует производить на 1-м этапе испытания дважды: после прекращения прогрева и при достижении нулевых температур на глубине 40 см, а на 2-м этапе – каждый раз перед приложением очередной ступени давления.

Отсчеты по приборам для измерения деформаций производят на обоих этапах испытаний через 10, 20, 30 и 60 мин от начала испытания и далее – через каждый час до условной стабилизации осадки штампа на каждой ступени нагружения.

После окончания испытания установку следует демонтировать, с поверхности оттаявшего грунта под штампом удалить верхний слой толщиной 10 см и отобрать два-три образца для лабораторных определений необходимых характеристик оттаявшего и уплотненного грунта. После этого следует удалить талый грунт, замерить и зарисовать чашу оттаявшего грунта под штампом.

В процессе испытания ведут журнал (табл. 2.)

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

По данным испытаний вычисляют среднее значение глубин оттаивания грунта (под центром и краями штампа) и приращение абсолютной осадки штампа ΔS_i для каждой ступени давления.

Для каждой ступени давления вычисляют среднее значение приращения относительной осадки $\Delta \delta_i$ и полного значения относительной осадки слоя по формулам:

$$\Delta \delta_i = \Delta S_i / H_i; \quad (1)$$

$$\delta_i = \delta_{i-1} + \Delta \delta_i. \quad (2)$$

По вычисленным значениям строят график зависимости относительной осадки штампа от давления $\delta = f(p)$ (рис.3).

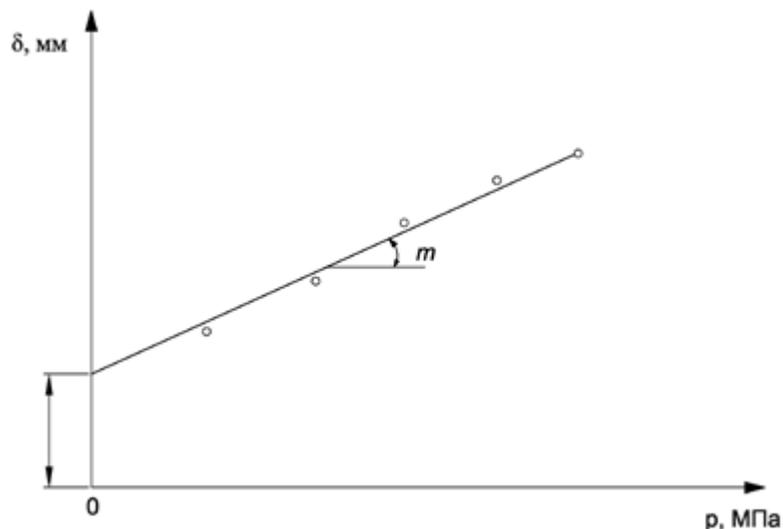


Рис. 3. Зависимость относительной деформации от нагрузки

За начальные значения p и δ (первая точка, включаемая в осреднение) принимают давление, равное напряжению $\Delta \delta_{iq,0}$ за конечные значения p_n и δ_n – такие, при которых нагрузка вызывает приращение осадки, превышающее ее значение на предыдущей ступени не более чем в два раза.

Коэффициент оттаивания A_{th} по графику $\delta = f(p)$ принимают равным отрезку, отсекаемому осредняющей прямой на оси ординат.

Коэффициент сжимаемости m , МПа, вычисляют по формуле

$$m = \Delta \delta / \Delta p K, \quad (3)$$

где $\Delta \delta$ – устанавливаемое по графику приращение значения относительной осадки на осредняющей прямой, соответствующее интервалу Δp ; K – безразмерный коэффициент напряженного состояния грунта, который принимают равным для крупнообломочных грунтов и сильновыветрелых скальных грунтов – 1,35, для песков и супесей – 1,30, для суглинков – 1,20, для глин – 1,0.

При необходимости по полученным значениям вычисляют модуль деформации грунта E по формуле

$$E = \beta / m, \quad (4)$$

где β – коэффициент, значения которого принимают равными для крупнообломочных грунтов и сильновыветрелых скальных грунтов – 0,8; для песков и супесей – 0,74; для суглинков – 0,62; для глин – 0,40. Коэффициент A_{th} определяют с точностью до 0,001, коэффициент m – до 0,0001.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ 20276–2012. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости. М.: Стандартинформ, 2012.
- [2] Котов П.И., Роман Л.Т., Сахаров И.И., Парамонов В.Н., Парамонов М.В. Влияние условий оттаивания и вида испытаний на деформационные характеристики оттаивающих грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов, (5), 2015. С. 8–13.
- [3] Методы геокриологических исследований: учеб. пособие / под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во МГУ, 2004. 512 с.

III.3. Определение деформаций оттаивающего массива (Л.Т. Роман, М.Н. Царапов, П.И. Котов)

Осадка при оттаивании массива грунта определяется на опытных площадках. План оборудования ее приведен на рис. 1.

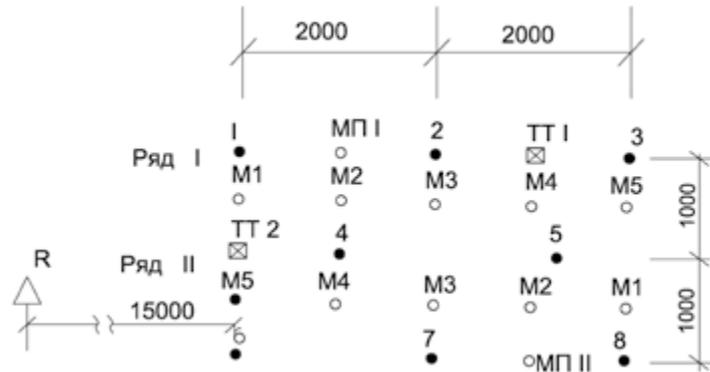


Рис.1. Схема расположения оборудования на опытной площадке:
1, 2 ... – нагреватели, М1... – осадочные марки, ТТ-1 ... – термометрические трубы,
R – репер, МП 11 – марки поверхностные

Сначала производится удаление растительного покрова, планировка поверхности грунта. Затем выполняется бурение скважин для установки нагревателей (1, 2 ...), осадочных марок М1, М2..., термометрических гирлянд ТТ-1, ТТ-2 ... При наличии обводненных грунтов скважины бурятся с использованием обсадных труб, которые устанавливаются до нижнего горизонта неустойчивых грунтов. После монтажа оборудования обсадные трубы извлекаются. Наименьший диаметр скважин принимается в зависимости от погружаемого элемента (см. табл. 1).

Таблица 1

Зависимость диаметра скважин от погружаемого элемента

Погружаемый элемент	Диаметр скважины, мм	
	без обсадки кважины	с обсадкой скважины
Электронагреватель	120	127
Труба термометрическая	100	100
Марка нивелировочная	300	300

Длина нагревателя, а также термометрических труб назначается из условий погружения их нижнего конца на 1,0 м выше требуемой границы оттаивания. Верхний конец должен быть на 0,5 м выше поверхности грунта.

Опускание в скважины нагревателей, термометрических труб, нивелировочных марок, репера производится с помощью кранов или копровых устройств.

Пазухи скважин заполняются сухим песком или грунтовой массой с тщательным трамбованием.

Электрооттаивание грунтов с помощью нагревателей производится либо омическим способом (рис 2), при котором нагреватели весь срок оттаивания работают в омическом режиме, либо комбинированным способом, при котором на первом этапе оттаивания нагреватели работают в омическом режиме, а на втором этапе – в электродном.

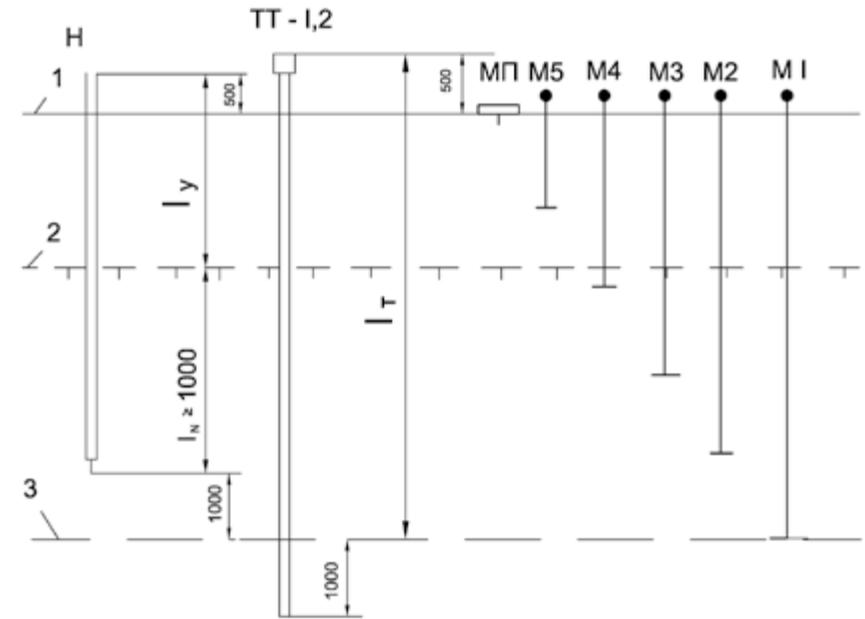


Рис.2. Схема установки нагревателя омического (Н), термометрической трубы (ТТ), марок осадочных (М) и репера (R)

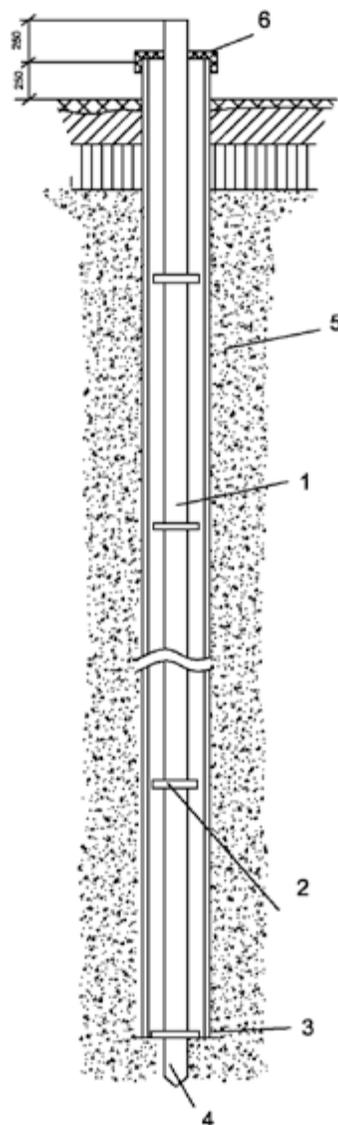
Продолжительность оттаивания, время переключения нагревателей в электродный режим устанавливаются на основе анализа температуры грунтов в термометрических скважинах до начала оттаивания и после подключения нагревателей. Переключение в электродный режим осуществляется после того, как температура в массиве поднимается до минус 1°С и выше. Контроль оттаивания помимо температурных замеров в скважинах необходимо осуществлять бурением ручным буром. В период бурения подача электроэнергии на нагреватели должна быть прекращена. Основным моментом в данном испытании являются замеры осадок оттаивающего массива грунта, выполняемые нивелированием осадочных марок и репера. Конструкция марок приведена на рис. 5.3.3.

Комплект марок должен обеспечивать замер осадок в характерных точках по глубине и площади оттаивающего массива, в том числе и на его поверхности. Реперное устройство необходимо заглублять не менее чем на 2 м в вечномёрзлую толщу и располагать не ближе, чем на 15 м от контура возможной чаши оттаивания. Первое нивелирование марок и репера выполняется после окончания монтажа оборудования опытной площадки и его выстойки не менее трех суток для стабилизации деформаций. Одновременно замеряется температура грунтового массива по всей глубине. Затем подключаются электронагреватели.

Выполняется постоянное наблюдение за формированием зоны оттаивания. Через двое суток осуществляется нивелирование всех марок и репера. После того, как чаша оттаивания достигнет глубины на 1 м меньше расчетной, подачу электроэнергии прекращают. С этого момента необходимо выполнять ежедневные наблюдения за осадками и температурным режимом до стабилизации границы оттаивания и условной стабилизации осадки. За условную стабилизацию осадки принимается такое состояние деформирования массива, при котором среднее значение осадки, приходящейся на 1 м оттаянной толщи, не превышает 0,5 мм за 24 ч по данным наблюдений за трое суток.

Рис. 3. Конструкция осадочной марки

1 – труба, 2 – центрирующая шайба, 3 – основание, 4 – острия, 5 – обсадная труба, 6 – крышка



Данные наблюдений записываются в журналы 1 и 2 (рис 5.3.4). Глубина оттаивания проверяется контрольным бурением с отметкой даты бурения и привязкой скважин к плану опытного участка,

По данным наблюдений рассчитывается относительная осадка послойно по глубине оттаянного массива:

$$\delta_i = \frac{S_{mn} - S_{mi}}{h_{om} - h_{mi}},$$

где S_{mn} , S_{mi} – стабилизированная осадка поверхностной и заглубленной марки (см); h – предельная глубина оттаивания массива грунта, см; h_{mi} – глубина заложения марки, см.

Полученные значения относительной осадки позволяют назначить нормативные значения коэффициентов оттаивания. Среднее значение коэффициента оттаивания A_{cp} всего массива будет равно S_{mn}/h от. Коэффициент оттаивания слоя грунта от поверхности до глубины заложения каждой марки будет равен относительной осадке, вычисленной по формуле, представленной выше. Для слоя грунта, расположенного в пределах глубин заложения двух марок i и $(i + 1)$, A вычисляется:

$$A = \frac{S_{mi} - S_{mi+1}}{h_{i+1} - h_i},$$

где S_{mi} и S_{mi+1} – осадки соответствующих марок, h_i и h_{i+1} – глубины их заложения.

Журнал 1														
Дата	Отчеты по нивелировочным рейкам		Этапы наблюдений											
	Репер	Марки												
	1, 2, ...	M ₁ , M ₂ , M ₃ , ...												
			До начала включения нагревателей											
			В период оттаивания											
			После окончания оттаивания до стабилизации осадки											
Журнал 2														
Дата	Температура грунта в скважинах по глубине, м								Этапы наблюдений					
	ТТ-1				ТТ-2									
	0	1	2	3	4	5	...	0	1	2	3	4	...	
														До начала включения нагревателей
														В период оттаивания
														После окончания оттаивания до стабилизации осадки

Рис 5.3.4. Журналы наблюдений

До и после испытаний определяются основные физические свойства грунтов (плотность, плотность частиц грунта, влажность, льдистость). Керны отбираются; до опыта – в процессе бурения термометрических скважин, после опыта – в процессе бурения контрольных скважин. Отбор кернов производится на уровне заложения осадочных марок.

ЛИТЕРАТУРА.

- [1] Методы определения механических свойств мерзлых грунтов. (п/р Э.Д. Ершова, Л.Т. Роман) М.: Изд-во МГУ, 1995. 161 с.
- [2] Методы геокриологических исследований. М.: Изд-во МГУ, 2004. 507 с.

III.4. Определение деформаций и сил пучения (Л.Т. Роман, М.Н. Царапов, П.И. Котов)

В полевых условиях деформации промерзающих грунтов определяются с помощью марок, силы пучения и деформации фундаментов — с помощью моделей фундаментов, устанавливаемых в пределах деятельного слоя. В процессе испытания должна проводиться комплексная оценка деформируемости грунтов при промерзании в течение зимнего периода, а также осадки оттаивания — в летний период года. Оборудование опытных площадок должно предусматривать определение всех видов сил пучения: касательных, действующих по боковой поверхности (τ) и нормальных вертикальных (σ_v), горизонтальных (σ_r); и наклонных (σ_n), действующих перпендикулярно к подошве и боковым поверхностям фундаментов (рис. 1). Обычно при массовых расчетах фундаментов учитывают касательные и нормальные силы пучения. Однако нормальные горизонтальные и наклонные силы пучения необходимо учитывать при расчете устойчивости подпорных и шпунтовых стенок, откосов креплений туннелей и т. д.

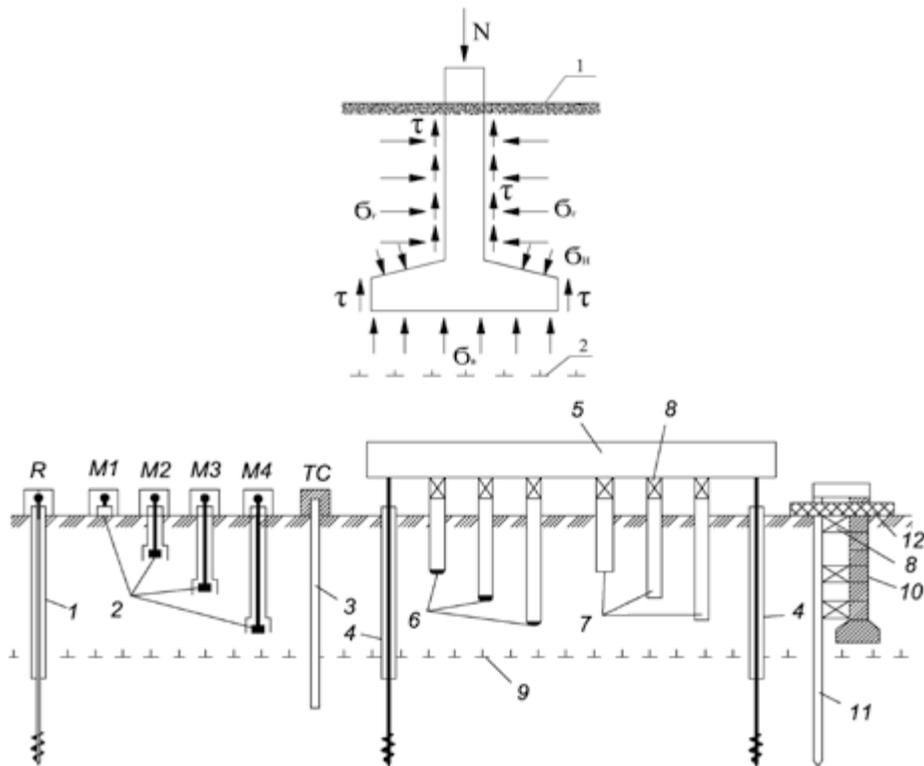


Рис. 1. Расчетная схема воздействия на фундамент сил морозного пучения: касательных (τ); нормальных: вертикальных (σ_v), горизонтальных (σ_r); наклонных (σ_n)

Определились два принципиальных подхода к фиксации сил пучения: 1 — замер сил пучения динамометром или с помощью протарированной балки (схема В.Ф. Жукова); 2 — уравновешивающей нагрузкой (схема Н.И. Быкова) (рис. 2).

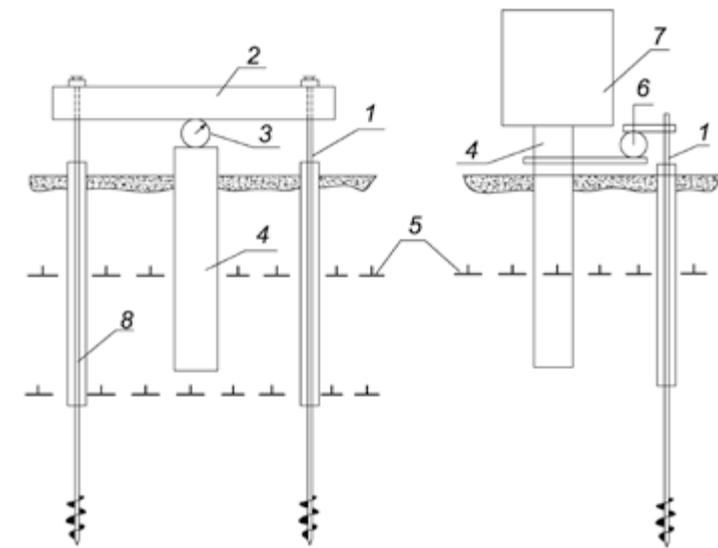


Рис. 2. Схемы установок для определения сил морозного пучения: а — по балочной схеме; б — по схеме уравновешивания сил. 1 — анкер; 2 — протарированная балочка; 3 — динамометр; 4 — модель фундамента; 5 — граница промерзания; 6 — мессура; 7 — груз, уравновешивающий силы пучения; 8 — обсадная труба анкера

Для комплексного многолетнего исследования всех необходимых характеристик процесса пучения должна быть оборудована опытная площадка размером не менее 20X20 м, удаленная от строений и насаждений не менее чем на 10 м. Схема оборудования площадки представлена на рис. 3.

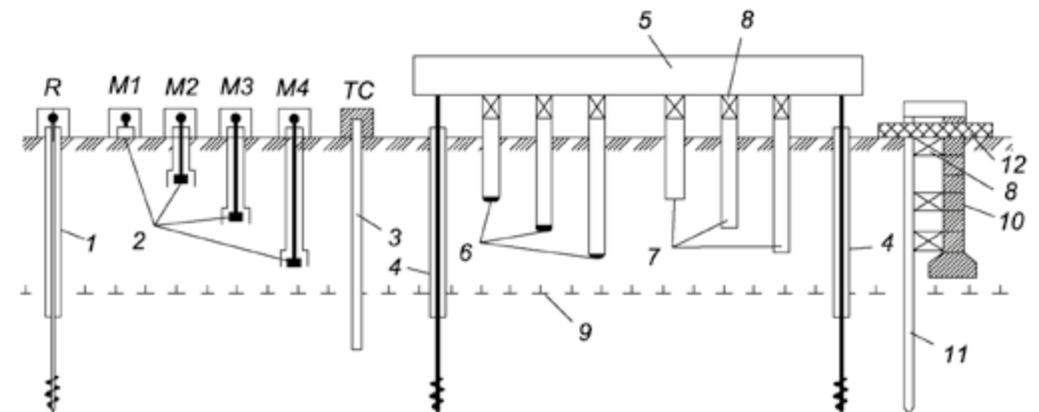
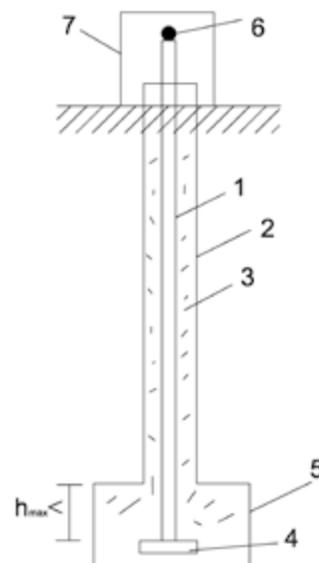


Рис. 3. Схема оборудования опытной площадки для определения деформаций и сил пучения:

1 — репер; 2 — марки; 3 — термометрическая скважина; 4 — анкер; 5 — балка; 6 — опытные фундаменты с изолированным торцом для определения касательных сил пучения; 7 — опытные фундаменты с изолированной боковой поверхностью для определения нормальных сил пучения; 8 — динамометры; 9 — граница промерзания; 10 — опытный фундамент для определения горизонтальных сил пучения; 11 — опора для динамометров; 12 — крышка шурфа

Деформации пучения измеряются посредством нивелирования марок. Конструктивная схема марки представлена на рис. 4. С промерзающим грунтом соприкасается металлический диск диаметром 100 мм, толщиной 8–10 мм. К диску приваривается стержень диаметром 20 мм. Длина стержня должна на 100 мм превышать глубину заложения марки. На стержень одевается обсадная труба, заполненная солидолом. В нижней части обсадной трубы предусматривают расширение, обеспечивающее свободное перемещение марки в процессе выпучивания.

Рис. 4. Принципиальная схема устройства марки:
1 – стержень; 2 – обсадная труба; 3 – солидол; 4 – диск;
5 – защитный колпак высотой больше максимальной деформации пучения;
6 – шарик; 7 – защитный короб



Конец стержня должен выступать над поверхностью не менее чем на 100 мм, иметь наконечник, оборудованный для возможности нивелирования рейки (например, жестко закрепленный металлический шарик). Каждый наконечник защищается от атмосферных воздействий и механических повреждений металлическим коробом с крышкой. Комплект марок обеспечивает послойное определение деформаций пучения в пределах всего слоя сезонного промерзания с интервалом 300 мм.

В пределах опытной площадки устанавливаются несколько термометрических скважин. Фрагменты фундаментов для определения касательных и нормальных сил пучения выполняют в виде одиночных опор, чаще всего бетонных и железобетонных свай квадратного сечения. При определении касательных сил пучения шероховатость боковой поверхности моделей соответствует шероховатости фундаментов проектируемых сооружений. Торцы моделей изолируются от соприкосновения с грунтом, для чего под торцы закладывают резиновые шары, из которых после установки модели удаляется воздух.

В моделях, предназначенных для определения нормальных сил пучения, боковая поверхность изолируется от соприкосновения с промерзающим грунтом. Наиболее удобным способом такой изоляции является установка обсадной трубы, пространство между стенками которой и фундаментом заполняется солидолом. Силы пучения определяются динамометрами, опирающимися в жесткую балку.

Модель фундамента для определения нормальных горизонтальных сил пучения состоит из отдельных блоков, соприкасающихся лишь одной из боковых поверхностей с промерзающим грунтом. Блоки устанавливаются друг на друга по слою солидола, что позволяет замерять нормальные горизонтальные силы пучения отдельно для каждого блока. Динамометры для фиксации напряжений, обусловленных этими силами, устанавливаются по высоте модели в специально оборудованной траншее. Они опираются в анкерную сваю.

Конструктивные элементы установки необходимо рассчитывать на действие ожидаемых сил пучения с учетом возможного их превышения в 1,5–2 раза. Упорные элементы опытной установки проектируются с таким расчетом, чтобы деформация, а следовательно, и максимальное перемещение опытного фундамента были минимальными и не превышали 5–6 мм.

Установка монтируется за 2–3 месяца до начала сезонного промерзания грунтов.

ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

При испытаниях фиксируют: глубину промерзания, температуру грунта, температуру воздуха, уровень грунтовых вод, определяют основные физические свойства грунта (плотность, влажность, гранулометрический состав). Регулярно контролируют устойчивость анкерных опор и опытного фундамента.

Наблюдения за силами пучения начинаются с наступлением морозного периода и продолжают с частотой 4–5 раз в декаду. Наблюдения за перемещением марок проводят 2–3 раза в месяц. В такие же сроки фиксируют глубину промерзания грунта. Для этого помимо замеров температуры в скважинах используются мерзлотомеры (например, Данилина, Ротомского). Глубина промерзания может определяться также бурением. Температура грунта замеряется в термометрических скважинах вытяжными ртутными термометрами, термопарами или электротермометрами сопротивления. Предпочтительно оборудовать скважины логгерами, позволяющими определять изменение температуры непрерывно в процессе всего опытного периода.

Температуру грунта необходимо замерять на глубинах 20, 50, 100, 150 см и далее через 1 м, а также на уровне подошвы каждой модели фундамента.

Влажность и плотность грунтов определяются в образцах, отобранных в отдельных скважинах через 0,5 м до и после промерзания грунта.

Разработано большое число опытных установок для определения деформаций и сил пучения, опубликованных и запатентованных. Рассмотрим методику определения сил пучения на одной из установок – системы Паталева – Алаева [1] (рис 5).

Данный пучиномер используется для исследования грунтов с задаваемыми составом и физическими свойствами со следующей методикой испытаний. Откапывается шурф диаметром 1,5 м на глубину, превышающую 2 м от торца опытной сваи. После выравнивания дна шурфа устраивается щебеночная подготовка толщиной не менее 15 см, монтируется анкерная плита и стержень. Анкерная плита покрывается слоем щебеночного грунта толщиной 15–20 см. Затем шурф заполняется слоем исследуемого грунта с послойным уплотнением до отметки торца сваи. Выполняется насадка сваи на анкерный стержень и производится дальнейшая укладка опытного грунта в шурф вокруг сваи с послойным трамбованием. Установка монтируется в весенне – летний период с целью уплотнения грунта, формирования естественной влажности, стабилизации осадок анкерного устройства до наступления начала промерзания. Перед началом промерзания индикаторы динамометра приводятся к нулевому показанию. В течение зимнего периода выполняются наблюдения за показаниями динамометра, температурным режимом грунта на поверхности и по глубине с фиксацией глубины промерзания.

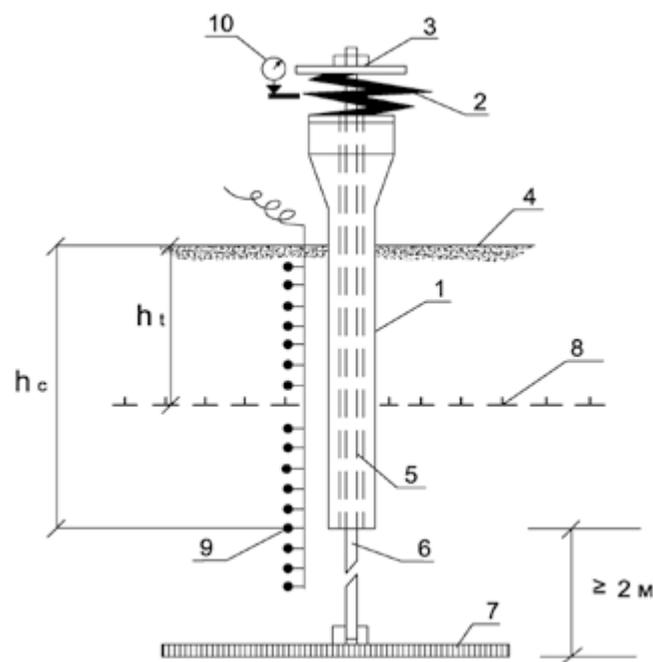


Рис. 5. Схема установки Паталеева – Алаева для определения сил пучения в полевых условиях
1 – опытная свая; 2 – динамометр; 3 – гайка для жесткого закрепления динамометра на стержне анкера; 4 – поверхность грунта; 5 – отверстие в теле сваи; 6 – анкер; 7 – заземление анкера в грунте; 8 – граница промерзания; 9 – гирлянда датчиков для замера температуры; 10 – индикаторы динамометра

По полученным данным наблюдений для каждого момента времени t вычисляется величина касательных сил пучения τ_t :

$$\tau_t = (N_t + G) / Uht, \quad (1)$$

где N_t – сила сжатия динамометра, кг; G – вес сваи и динамометра, кг; U – периметр сваи, см;

После того, как граница промерзания грунта вокруг экспериментальной сваи, замеряемая гирляндой терморезисторов 9, превысит глубину заложения ее торца от поверхности грунта 4, данная установка позволяет определить и нормальные силы пучения σ_t . Фиксируется период времени, за который глубина промерзания достигает глубины заложения торца сваи.

III.5. Определение сопротивления мерзлого грунта срезу (М.Н. Царапов)

Целью испытаний является определение прочностных характеристик мерзлых грунтов в соответствии с теорией предельного равновесия Кулона – Мора: сцепления, коэффициента внутреннего трения, модуля общей деформации. Схема установки для испытаний приведена на рис. 1. Испытание выполняется в шурфе, при выработке которого на дне оставляют не менее трех целиков ненарушенной структуры высотой и шириной не менее 30 см. Расстояние между целиками должно быть не менее 20 см, форма целиков – кубическая, либо в виде параллелограмма. После зачистки сторон замеряется высота и ширина по краям и середине каждого целика, рассчитываются средние значения размеров и объем.

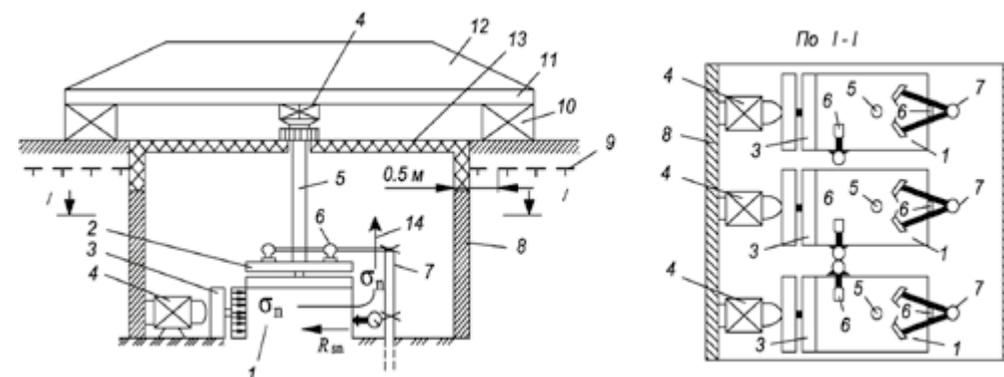


Рис. 1. Схема установки для определения сопротивления мерзлого грунта срезу.

1 – целик; 2, 3 – горизонтальный и вертикальный штампы; 4 – домкраты; 5 – штанга; 6 – индикаторы; 7 – реперная установка; 8 – крепление шурфа; 9 – граница оттаивания; 10 – опора для платформы; 12 – платформа; 13 – груз; 13 – теплоизоляция; 14 – термогирлянда

Затем на целики устанавливаются штампы, монтируются домкраты. Домкрат для передачи горизонтальной нагрузки упирается в крепление шурфа. Домкрат для задания вертикальной нагрузки монтируется на штампе и упирается в платформу, смонтированную на опорах и нагруженную грузом. Деформации грунта замеряются индикаторами часового типа либо прогибомерами, смонтированными на реперной установке. Крепление шурфа должно быть водонепроницаемым и заглубляться не менее чем на 0.5 м ниже границы сезонного оттаивания. Для обеспечения постоянства температуры испытываемых целиков стенки и потолок шурфа теплоизолируются.

Проведение испытаний. После монтажа загрузочных плит, установки домкратов и измерительных приборов вся система выдерживается не менее 24 часов с целью достижения стабилизации температуры грунта. Далее на каждый целик задается нормальное давление: на первый целик – равное природному, на второй – больше природного в 1.5 раза, на третий – больше в 2 раза, чем на второй. После приложения нормального давления целики выдерживаются до условной стабилизации деформаций. Деформации замеряются через 5, 10, 20, 30, 60 мин от начала испытаний, затем через 3, 6 и 12 ч, и в дальнейшем – с интервалом

12 ч. Стабилизация деформаций считается достигнутой, если ее приращение не превышает 0.01 мм за 12 ч в течение двух следующих друг за другом замеров через этот интервал времени.

Обработка результатов. По данным испытаний оформляется журнал (табл. 1), включающий параметры состава и физических свойств, опытные замеры.

Таблица 1.

Организация (лаборатория) _____
 Журнал испытаний грунта _____
 Объект (пункт) _____
 Сооружение _____
 Шурф (скважина) № _____
 Глубина отбора образца, м _____
 Лабораторный номер образца _____
 Наименование грунта _____
 Сложение грунта _____
 Визуальное описание грунта в лаборатории _____

Вид испытания _____
 Прибор (тип, номер) _____
 Схема испытания _____
 Схема фильтрации _____
 Сведения о замачивании _____
 Жидкость для замачивания (фильтрации) _____
 Дата испытаний: начало _____ окончание _____
 Данные о рабочем кольце (образце):
 Высота, мм _____
 Диаметр, мм _____
 Площадь, см² _____
 Объем, см³ _____
 Масса, г _____
 Масса с грунтом, г _____
 Масса образца, _____

Физические характеристики грунта

Показатели	ρ	ρ_d	W_{tot}	W_w	i	$T, ^\circ C$	ρ_s	Примечание
До испытания на контрольном целике								
После испытания								

№ Испытания	Дата	Время	Нормальное давление при срезе, МПа	Вертикальная деформация, мм	Касательная нагрузка, МПа	Показания индикатора деформация среза	Деформация среза, мм	Сопротивление грунта срезу, МПа	Примечание

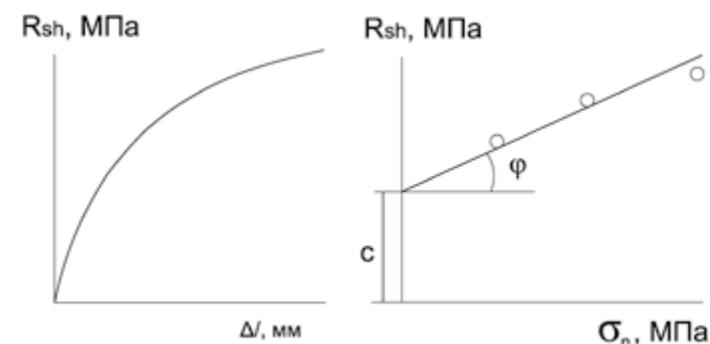


Рис. 2. График обработки опытных данных при испытании мерзлого грунта на срез: зависимость деформации среза Δl от сдвигающего напряжения R_{sh} (а); зависимость предельного сопротивления срезу R_{sh} от нормального давления σ_n

По данным испытаний определяется относительная вертикальная деформация каждого целика (ε_t) как отношение абсолютной стабилизированной деформации (S_t) к начальной, до опыта, высоте целика (h):

$$\varepsilon_t = S_t / h$$

Модуль общей деформации (E_0) рассчитывается для каждого целика по формуле:

$$E_0 = \sigma_n / \varepsilon_t$$

где σ_n – нормальное напряжение на горизонтальной поверхности целика.

После стабилизации вертикальной деформации прикладывается горизонтальная сдвигающая нагрузка посредством горизонтально установленных домкратов. Ее увеличение производится постепенно до полного сдвига целика. По максимальному значению горизонтальной нагрузки рассчитывается предельное сопротивление сдвигу при каждом заданном σ_n :

$$R_{sh} = N_h / F_h,$$

где N_h – сдвигающее горизонтальное усилие; F_h – площадь сдвига.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Методы определения механических свойств мерзлых грунтов. (Под. ред. Э.Д. Ершова, Л.Т. Роман). Изд-во МГУ, 1995. 181 с.
- [2] Методы геокриологических исследований. Изд-во МГУ, 2004. 506 с.

III.6. Определение эквивалентного сцепления вдавливанием шарового штампа (Л.Т. Роман)

Испытание мерзлых грунтов вдавливанием шарового штампа в полевых условиях позволяет определить эквивалентное сцепление, по значению которого вычисляется сопротивление сжатию и модуль деформации мерзлых грунтов.

Схема установки для полевых испытаний шаровым штампом представлена на рис. 1. Подготовка к испытанию осуществляется в следующем порядке: выполняется проходка шурфа на требуемую глубину; зачищается дно шурфа с приданием поверхности горизонтального уровня; монтируется штамп, штанга, рычажное устройство, гирлянда для замера температуры и измерительная аппаратура. Станина должна быть установлена горизонтально и закреплена анкерами. Над установкой монтируется навес с устройством теплоизоляции. В собранном виде установка выдерживается не менее двух суток для стабилизации температуры грунта.

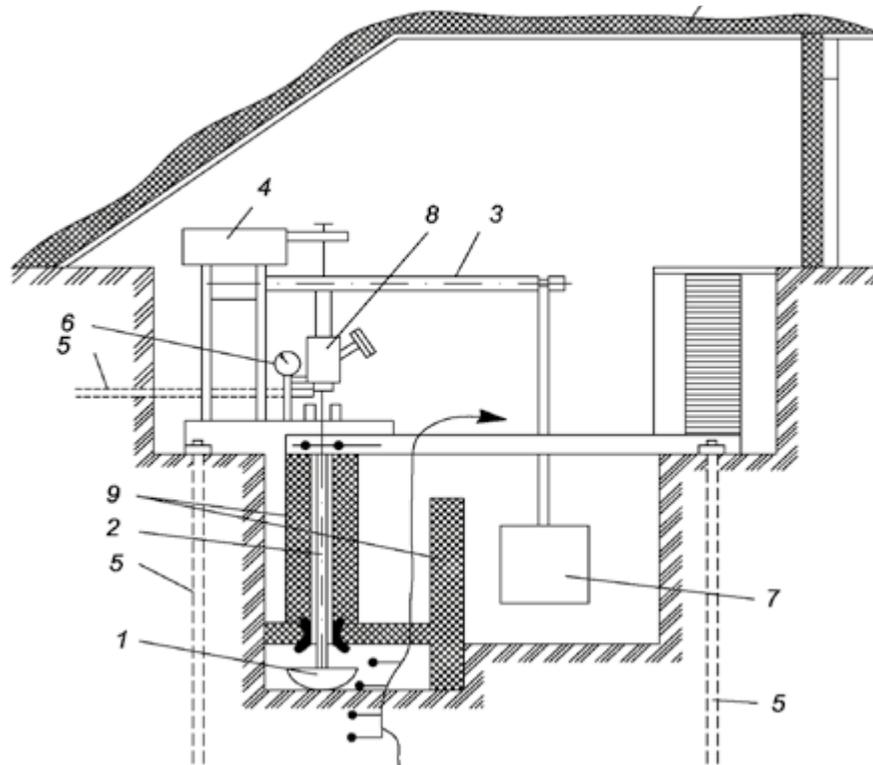


Рис. 1. Схема установки для испытания мерзлых грунтов шаровым штампом в полевых условиях

1 – шаровой штамп; 2 – направляющая втулка; 3 – рычаг; 4 – станина для крепления рычага;
5 – анкера для крепления станины; 6 – индикатор; 7 – груз; 8 – динамометр;
9 – теплоизоляция; 10 – термогирлянда; 11 – теплоизоляционный навес

Проведение испытаний. Перед началом испытаний аппаратура для замера деформаций и напряжений приводится в нулевое положение, замеряется температура грунта под штампом и на поверхности с помощью термометрической гирлянды. На рычаг прикладывается статическая нагрузка и фиксируется время ее приложения. Величина нагрузки зависит от вида грунта, его температуры и должна удовлетворять условию:

$$0.005 d < S_{15} < 0.05 d, \quad (1)$$

где d – диаметр штампа, мм; S_{15} – глубина погружения штампа в грунт (осадка штампа) через 15 мин после приложения нагрузки, мм.

В зависимости от соотношения плеч рычага при диаметре штампа 220 мм величину нагрузки на рычаг следует устанавливать в соответствии с величинами нагрузки на штамп, приведенными в табл. 1, и производить корректировку в соответствии с условием (1).

Таблица 1
Величина нагрузки на штамп в зависимости от вида грунта и его состояния

Вид грунта	Состояние мерзлого грунта	Величина нагрузки на штамп, кН (кг)
Пески мелкие и супеси	Пластично-мерзлое	200 (20)
	Твердо-мерзлое	250 (25)
Глины и суглинки	Пластично-мерзлое	100 (10)
	Твердо-мерзлое	150 (15)

В процессе испытаний осуществляются замеры осадок штампа через 5, 10, 20, 30, 60 мин, затем через 3, 6, 12 час и в дальнейшем – с интервалом 12 ч до условной стабилизации деформаций грунта. Стабилизация считается достигнутой, если приращение деформации не превышает 0.01 мм за время, равное 12 ч. Это условие должно соблюдаться в течение двух следующих друг за другом определений деформации.

Обработка результатов. Оформляется журнал и таблица с результатами испытаний (табл. 2).

Таблица 2

Организация (лаборатория) _____

Журнал испытаний грунта _____

Объект (пункт) _____

Сооружение _____

Шурф (скважина) № _____

Глубина отбора образца, м _____

Лабораторный номер образца _____

Наименование грунта _____

Сложение грунта _____

Визуальное описание грунта в лаборатории _____

Вид испытания _____

Прибор (тип, номер) _____

Схема испытания _____
 Схема фильтрации _____
 Сведения о замачивании _____
 Жидкость для замачивания (фильтрации) _____
 Дата испытаний: начало _____ окончание _____
 Данные о рабочем кольце (образце):
 Высота, мм _____
 Диаметр, мм _____
 Площадь, см² _____
 Объем, см³ _____
 Масса, г _____
 Масса с грунтом, г _____
 Масса образца, _____

Физические характеристики грунта

Показатели	ρ	ρ_d	W_{tot}	W_w	i	$T, ^\circ\text{C}$	ρ_s	Примечание
До испытания на контрольном целике								
После испытания								

Дата испытания	Температура испытания $T, ^\circ\text{C}$	Время снятия отчета $t_i, \text{ч}$	Время от начала опыта $t, \text{ч}$	Отчет по датчику деформаций	Глубина погружения шарикового штампа $S_B, \text{мм}$	Предельно-длительное значение эквивалентного сцепления $s_{eq}, \text{МПа}$
1	2	3	4	5	6	7

По данным испытаний рассчитывается эквивалентное сцепление C_t за период испытаний:

$$C_t = 0.18 P / \pi d S_t, \quad (2)$$

а также модуль общей деформации E_0 по формулам: для песчаных грунтов:

$$E_{ot} = [3(1 - \mu^2)P] / 4r^{1/2} S_t^{3/2}, \quad (3)$$

для глинистых грунтов:

$$E_{ot} = [3(1 - \mu^2)P] / [4 S_t^{3/2} (d - S_t)^{1/2}], \quad (4)$$

где P – нагрузка на штамп, H (кгс); S_t – осадка штампа, см, за период времени t ; d, r – соответственно диаметр и радиус штампа; μ – коэффициент Пуассона.

По данным испытаний эквивалентного сцепления C_t определяются параметры β и B по графику (рис. 2)

По уравнению длительной прочности [Вялов., 1959] определяется длительное эквивалентное сцепление на период времени t срока службы сооружений:

$$C_{tc} = \beta / [\ln(t + t^*) / B], \quad (5)$$

где β – параметр, равный $\text{ctg } \varphi$; B – параметр, равный значению $\ln(t)$ на пересечении прямой $1/C_t$ с временной осью (см. рис. 2).

Величина C_t позволяет получить расчетное давление R под подошвой фундамента и торца свай, а также рассчитать длительный модуль деформации на период времени t срока службы сооружений по формулам (3), (4), в которые подставляется величина равная:

$$S_{tc} = 0.18 P / \pi d C_{tc} \quad (6)$$

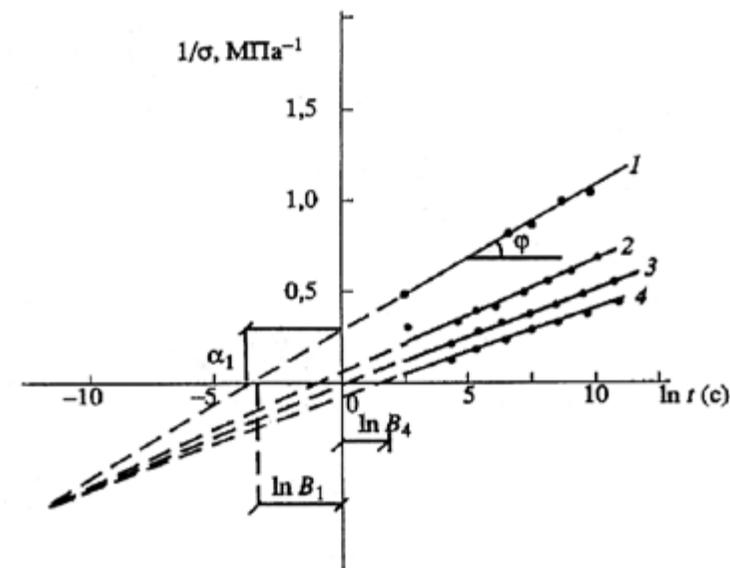


Рис. 2. Пример зависимости обратной величины $(1/\sigma_t) = (1/C_t)$ от $\ln(t)$ для мерзлой глины (вдавливание сферического штампа при различной температуре) [Вялов и др., 1962]: 1 – (-5); 2 – (-10); 3 – (-15); 4 – (-20)°C

ЛИТЕРАТУРА

1. Вялов С.С. Реологические свойства и несущая способность мерзлых грунтов. Изд-во АН СССР, 1959. 190 с.
2. Вялов С.С., Гмошинский В.Г., Городецкий С.Э., Григорьева В.Г., Зарецкий Ю.К., Пекарская Н.К., Шушерина Е.П. Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты ледо-грунтовых ограждений. М.: Изд-во АН СССР, 1962 254 с.
3. СП 25 13330. 2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: ФЦС. 2012ю 52 с.
4. Метод геокриологических исследований. М.: Изд-во МГУ. 2004. 512 с.
5. Методы определения механических свойств мерзлых грунтов. М.: Изд-во МГУ. 1995. 161 с.

III.7. Определение сопротивления резанию (Л.Т. Роман)

Определение сопротивления резанию мерзлых грунтов необходимо для определения рабочих параметров механизмов, предназначенных при разработке как поверхностных, так и глубинных слоев мерзлых грунтов. Прибор представляет собой цилиндрический стержень с заостренным наконечником (рис.1). Подобран оптимальный угол заострения, равный 120°.

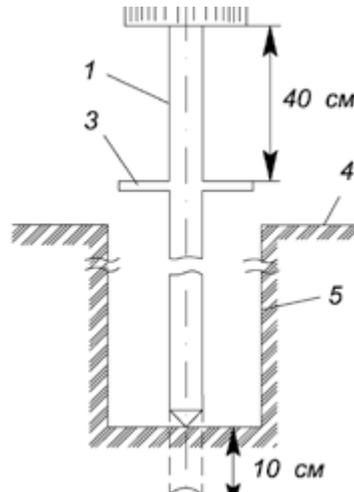


Рис. 1. Схема динамического ударника для определения сопротивления мерзлого грунта резанию: 1 – стержень с заостренным наконечником; 2 – груз; 3 – опорная площадка для груза; 4 – поверхность грунта; 5 – стенка шурфа

Испытание заключается в свободном сбрасывании груза с верхнего положения до ограничителя. Высота падения составляет 40 см. Сбрасывание груза выполняется до тех пор, пока стержень с заостренным наконечником не погрузится в мерзлый грунт на 10 см. Производится подсчет количества ударов, затраченных для погружения заостренного стержня в мерзлый грунт на глубину 10 см. Испытания выполняются с 5-ти кратной повторностью. По данным испытаний заполняется журнал, в котором указывается объект, дата испытаний, физические свойства грунта, а также таблица опытных данных (табл. 1).

Сопротивление резанию R определяется дифференцированно в зависимости от конструктивных особенностей различных механизмов по эмпирической формуле А.Н. Зеленина [1]:

$$R = N h \Delta \sqrt{b}, \quad (1)$$

где N – число ударов динамического плотномера с цилиндрическим наконечником (площадь 1 см²; угол заострения 120°), необходимых для его погружения в мерзлый грунт на глубину 10 см; Δ – коэффициент затупления, равный для острого рабочего органа 0.85, для слегка затупленного – 1, для сильно затупленного – 2; b, h – соответственно ширина режущего рабочего органа и глубина резания данного механизма, см.

Опытные данные при определении сопротивления резанию мерзлых грунтов

Таблица 1

№ испытаний	Дата	Число ударов динамического плотномера при повторных испытаниях					Температура	Вид грунта	Примечание
		N1	N2	N3	N4	N5			

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. М.: Машиностроение, 1968. 375 с.
- [2] Методы геокриологических исследований. М.: Изд-во МГУ, 2004. 507 с.
- [3] Роман Л.Т. Механика мерзлых грунтов. М.: МАИК «Наука», 2002. 426 с.

Оригинал-макет подготовлен в издательстве «КДУ»
Формат 70 × 100 / 16. Бумага офсетная. Заказ № Т-17__.
Печать цифровая. Заявленный тираж 1000 экз. (печать по требованию).
Издательство «КДУ»: тел. +7 (495) 638-57-34, www.kdu.ru