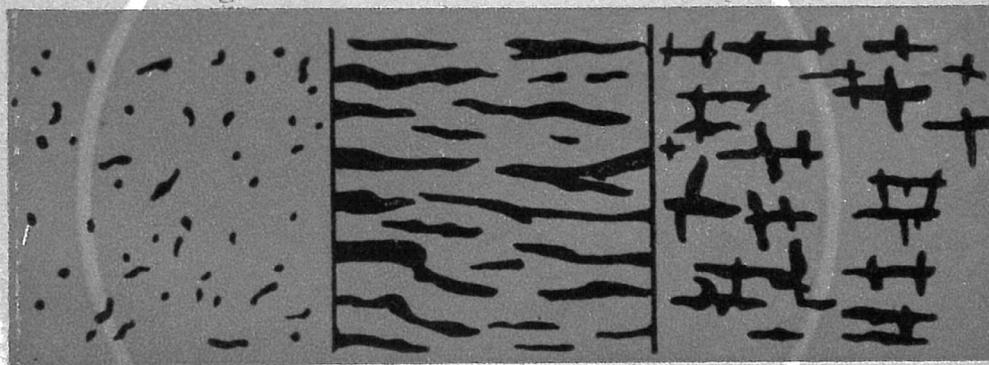


А. И. Левкович
Инженерно-
геологические
изыскания
для
строительства
на
вечномерзлых
грунтах



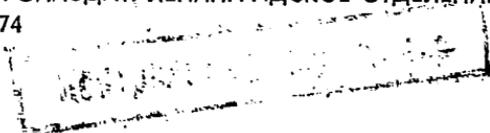
11206

А. И. Левкович

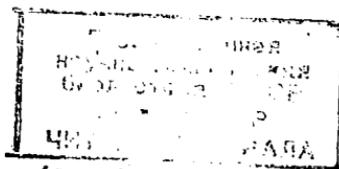
Инженерно-
геологические
изыскания
для
строительства
на
вечномерзлых
грунтах



ЛЕНИНГРАД
СТРОЙИЗДАТ, ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1974



УДК 624.131.3 : 624.139



34
22842 74-11206

Научный редактор — д-р геол.-минерал. наук Г. П. Мазуров

Левкович А. И. Инженерно-геологические изыскания для строительства на вечномёрзлых грунтах. Л., Стройиздат (Ленингр. отд-ние), 1974, с. 144

Книга освещает комплекс вопросов производства инженерно-геологических изысканий для строительства на вечномёрзлых грунтах. В ней изложены основные представления об этих грунтах, показаны их специфические свойства и особенности районов их распространения. Подробно рассматриваются задачи, принципы выполнения и состав изыскательских работ. Большое внимание уделено методике полевых работ и прогнозированию температурного режима вечномёрзлых грунтов.

Книга предназначена для инженерно-технических работников — изыскателей и проектировщиков, ведущих работы в районах распространения вечномёрзлых грунтов.

Рис. 8, список лит.: 44 назв.

Л $\frac{30206-069}{047(01)-74}$ 119-74

© Стройиздат. Ленинградское отделение, 1974

Август Исаакович Левкович
ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ
ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Редактор издательства Б. А. Китайчик
Обложка художника В. П. Сысалова
Технический редактор В. В. Живнова
Корректор И. И. Кудревич

Сдано в набор 5/X 1973 г. Подписано к печати 6/II 1974 г.
М-36050. Формат бумаги 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 3. Усл.-печ.
л. 9.0+вкл. 0,27 усл. п. л. Уч.-изд. л. 9,94. Изд. № 1505-Л.
Тираж 4500 экз. Заказ № 823. Цена 51 коп.

Стройиздат, Ленинградское отделение
191011, Ленинград, пл. Островского, 6

Ордена Трудового Красного Знамени
Ленинградская типография № 2 имени Евгении Соколовой
Союзполиграфпрома при Государственном комитете
Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли
198052, Ленинград, Л-52, Измайловский проспект, 29

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ**§ 1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ**

Мерзлые грунты отличаются от талых повышенной прочностью, которая обусловлена цементирующими свойствами находящегося в них льда. Поэтому наиболее существенным признаком мерзлого состояния грунтов является присутствие льда. Замерзание воды, как известно, начинается при нулевой температуре. Однако это положение справедливо, строго говоря, лишь для дистиллированной воды. Влага, содержащаяся в грунтах, часто в той или иной степени минерализована, в связи с чем температура ее замерзания в этих случаях несколько ниже 0°C . Кроме того, некоторая часть влаги в грунтах обычно находится в связанном состоянии и температура замерзания такой влаги также ниже 0°C . В связи с указанными обстоятельствами существует понятие температуры замерзания грунта, которая в зависимости от состава и влажности грунта может быть нулевой или отрицательной.* Поэтому мерзлыми в общем случае принято считать грунты, находящиеся при нулевой или отрицательной температуре и содержащие лед.

В состав мерзлых грунтов входят разновидности льда, отличающиеся друг от друга по своему генезису, а также по влиянию на прочностные и деформационные свойства грунтов. Целесообразная генетическая классификация подземных льдов была предложена П. А. Шумским [43]. Он выделил конституционные, пещерно-жилые и погребенные льды.

Конституционные льды являются структурообразующими для грунтов и подразделяются на лед-цемент (поровый лед), сегрегационный и инъекционный лед. Лед-цемент образуется при замерзании главным образом связанной влаги в порах грунта между его частицами или агрегатами частиц и цементирует их. Сегрегационный лед образуется по преимуществу в виде разнообразных обособленных ледяных тел (скоплений кристаллов, гнезд, шлиров, прослоек, линз и т. п.) при миграции влаги к фронту промерзания. Образование

* Для грунтов, содержащих только связанную воду, следует говорить о температуре начала замерзания грунта.

сегрегационного льда связано в основном с перераспределением влаги в промерзающих грунтах без сколько-нибудь существенного подтока ее извне, чем объясняются в целом небольшие мощность или толщина этих ледяных отдельностей, не превышающие обычно нескольких сантиметров. В направлении, параллельном фронту промерзания, размеры указанных отдельностей могут быть достаточно велики.

При внедрении воды в мерзлые или промерзающие грунты формируются инъекционные льды. В условиях свободного подтока влаги к фронту промерзания, например за счет грунтовых вод, инъекционные образования льда могут достигать значительных размеров.

К макроформам подземных льдов относятся также пещерно-жилльные и погребенные льды. Образование пещерно-жилльных льдов связано с заполнением льдом трещин и других полостей в вечномерзлых грунтах, а погребенных льдов — с перекрытием осадками снежников, наледей и других наземных льдов.

В природе достаточно часто встречаются грунты, имеющие отрицательную температуру, но не содержащие льда, например засоленные грунты, «сухие» пески, крупнообломочные грунты и т. п. Такие грунты называют морозными. В СНиП II-Б.6—66 выделяется одна разновидность морозных грунтов — сыпучемерзлые грунты, между частицами которых отсутствуют какие-либо прочностные связи. При этом подразумевается, что такие грунты при увлажнении и образовании в них льда приобретут специфические прочностные и деформационные свойства мерзлых грунтов. Аналогичные изменения могут претерпевать грунты осадочного происхождения с малопрочными цементационными связями между частицами, а также грунты разрушенной коры выветривания. В отдельных случаях при увлажнении морозных грунтов и образовании в них льда могут изменяться прочностные и деформационные свойства грунтов, обладающих весьма жесткими связями, т. е. грунтов магматического, метаморфического и отчасти осадочного происхождения. В этих случаях изменения обусловлены в основном образованием трещин, которые затем заполняются льдом. По этим причинам разделение грунтов на мерзлые и морозные является достаточно условным, и при инженерно-геологических изысканиях участки, занятые морозными грунтами, ввиду возможного неблагоприятного изменения свойств последних при строительстве, следует рассматривать как участки, сложенные мерзлыми грунтами.

В мерзлом состоянии грунты могут находиться от нескольких часов до многих сотен и тысяч лет. В зависимости от этого выделяются сезонно мерзлые грунты, перелетки и вечно мерзлые грунты.

Сезонномерзлые грунты образуются при зимнем промерзании и полностью оттаивают летом. В некоторых случаях, когда

зимы бывают холоднее, чем в среднем по норме, и относительно малоснежны, грунт зимой промерзает глубже обычного и за лето не успевает оттаять. Такие неоттаявшие грунты называются перелетками, а возраст их, как правило, не превышает 3—5 лет. Если грунты находятся в мерзлом состоянии от 3 лет и более, то их называют вечномерзлыми.

В литературе встречаются и другие названия для грунтов, длительное время находящихся в мерзлом состоянии: многолетнемерзлые грунты, вечная мерзлота, многолетняя мерзлота, многолетняя криолитозона и другие. Однако все эти названия не нормированы, и поэтому ими могут обозначаться не полностью совпадающие понятия, вследствие чего их употребления следует избегать.

В соответствии со СНиП II-Б.6—66, мерзлые песчано-глинистые грунты по температурно-прочностному состоянию подразделяются на твердомерзлые, пластичномерзлые и сыпучемерзлые. Остальные виды мерзлых грунтов по температурно-прочностному состоянию специально не классифицируются, так как предсказать их свойства и реакцию на нагрузку только по составу и температуре нельзя. По этой причине не классифицируются, например, мерзлые грунты, засоленность которых составляет более 0,25% (от веса сухого грунта).

В области распространения вечной мерзлоты среднегодовая температура грунтов может быть и отрицательной, и нулевой, и положительной. В последнем случае грунты следует считать талыми, в остальных — вечномерзлыми.

Так называемой геофизической границей между вечномерзлыми и талыми грунтами служит нулевая изотерма среднегодовых температур грунта. Физическую границу между грунтами мерзлыми и талыми в какой-нибудь момент времени представляет нулевая изотерма температур грунта в этот же момент времени. Как указывалось выше, температура замерзания грунтов не всегда равна 0°С, и поэтому положение физической границы в общем случае определится изотермой температуры замерзания (или начала замерзания) грунтов. Физическая и геофизическая границы, как это вытекает из их определения, могут совпадать лишь в частных случаях. Как физическая, так и геофизическая границы используются для характеристики распространения по площади и залегания в разрезе вечномерзлых и талых грунтов.

Существует понятие географической границы между вечномерзлыми и талыми грунтами — она ограничивает районы распространения вечномерзлых грунтов с юга. Талые грунты в этих районах приурочены обычно к долинам рек, участкам тектонических нарушений, зонам интенсивной циркуляции подземных вод и другим отепляемым участкам. Поэтому положение географической границы районов распространения вечномерзлых

грунтов может совпасть с положением южной геофизической границы лишь в частных случаях. В горных областях фиксируется высотная граница распространения вечномерзлых грунтов, равнозначная широтной географической границе.

Верхний горизонт вечномерзлой толщи летом оттаивает, а зимой замерзает. В тех случаях, когда оттаявший слой зимой промерзает целиком, его называют слоем сезонного оттаивания. Подошва слоя сезонного оттаивания в этом случае сливается с поверхностью вечномерзлых грунтов (сливающаяся мерзлота).

В случае глубокого залегания вечномерзлой толщи грунт часто не промерзает до ее поверхности из-за утепляющего воздействия циркуляции грунтовых вод, для которых вечномерзлые грунты являются водоупором, или мощного снежного покрова. Такой промерзающий слой называется слоем сезонного промерзания, а мерзлота в данном случае — несливающейся, или разобщенной. Между подошвой слоя сезонного промерзания и кровлей вечномерзлых грунтов в этом случае существует талик.* Возникновение упоминавшихся выше перелетков возможно лишь в пределах слоя сезонного промерзания и этого талика.

Вечномерзлые грунты могут иметь мощность от нескольких до десятков, сотен и тысяч метров. Талики, прерывающие сплошность вечномерзлых грунтов на всю их мощность, связаны в основном с деятельностью подземных вод. Такие талики могут быть также приурочены к зонам тектонических нарушений.

Вообще же перерывы по вертикали для мощных толщ вечномерзлых грунтов малохарактерны. Это объясняется тем, что периоды интенсивного промерзания грунтов связаны с глобальнокосмическими причинами и поэтому весьма длительны. Достаточно длительны также и перерывы между циклами интенсивного промерзания. Зато в плане отмечается значительная пестрота в чередовании вечномерзлых и талых грунтов, что связано, как это уже отмечалось, с локальными (в основном) утепляющими воздействиями.

Талики, развитые с поверхности, подразделяются на сквозные и несквозные (или псевдоталики). Сквозные талики прорезают всю толщу вечномерзлых грунтов, в отличие от несквозных. Утепляющее воздействие различных поверхностных водотоков и грунтовых вод может быть очень значительным. Движущаяся вода даже при близкой к 0°C собственной температуре интенсивно утепляет мерзлые грунты. Если при этом поток воды имеет постоянный расход, то образование таликов практически неизбежно.

* Вообще таликом называют любой участок, слой, линзу и другие формы залегания талых грунтов среди мерзлых.

Сквозные талики образуются в результате длительного воздействия больших рек. Псевдоталики развиты под руслами небольших, иногда перемерзающих рек, а также под озерами, так как в последних движение воды — основной отепляющий фактор — сказывается незначительно.

Грунтовые воды, развитые в районах распространения вечномерзлых грунтов, в зависимости от их положения в разрезе относительно вечномерзлых грунтов подразделяются на надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные. Надмерзлотные воды циркулируют над кровлей вечномерзлых грунтов. В зависимости от водообильности этого горизонта и условий промерзания грунта надмерзлотные воды могут существовать сезонно (сливающаяся мерзлота) или круглый год (несливающаяся мерзлота). Поздней осенью и в первой половине зимы, когда промерзание грунтов происходит особенно интенсивно, надмерзлотные воды в зоне промерзания становятся напорными вследствие уменьшения объема водоносного слоя (талика). Межмерзлотные воды связаны с таликами, образованными ими в толще вечномерзлых грунтов. Водообильность этих водоносных горизонтов, как правило, невелика. Это связано с тем, что талики, по которым циркулируют межмерзлотные воды, обычно не являются сквозными. Подмерзлотные воды развиты под подошвой вечномерзлых грунтов и могут иметь самый разный режим.

Важнейшей характеристикой вечномерзлых грунтов является их температурный режим, который удобно определить, используя понятие температурного поля. Под температурным полем некоторого грунтового массива в какой-то момент времени понимается совокупность значений температур во всех точках этого массива в тот же момент времени. Температурное поле называют иногда распределением температур. Если взять последовательную совокупность температурных полей в какой-либо грунтовой области за некоторый промежуток времени, то она будет характеризовать температурный режим этой области за тот же промежуток времени. Обычно температурный режим грунтов (какого-то массива или области исследований) за год характеризуют совокупностью температурных полей, взятых на конец каждой декады или каждого месяца. Температурный режим грунтов изменчив, так как изменчивы внешние и внутренние источники энергии, за счет которых он формируется.

Основным источником внешней энергии служит Солнце, интенсивность лучистой энергии которого в 10^6 — 10^8 раз превышает интенсивность прочих внешних источников. Внутренними источниками энергии являются ядерные реакции, изменение скорости вращения Земли, гравитационные процессы и экзотермические реакции. В совокупности энергия этих источников в 10^4 раз меньше лучистой энергии Солнца. Энергия внутренних источников во времени и в региональном плане в целом отличается

стабильностью, и поэтому можно считать, что изменения температурного режима грунтов происходят в результате изменений интенсивности солнечной энергии.

Интенсивность лучистой энергии Солнца, поступающей на различные участки земной поверхности, изменяется в результате суточного вращения Земли, ее годового движения по орбите, а также циклических изменений солнечной активности. Кроме того, сами участки в силу разных свойств собственной поверхности воспринимают различные количества этой энергии. Соответственно различаются суточные колебания температуры грунтов, распространяющиеся до глубины в несколько десятков сантиметров, годовые колебания температуры, глубина которых в среднем составляет 10—15 м, и многолетние (вековые) колебания, которые в зависимости от величины периода и амплитуды могут изменять температуру грунтов до глубины в несколько десятков метров и более.

Наиболее наглядными и наиболее существенными для строительства являются годовые колебания температуры грунтов, с которыми связано их сезонное промерзание и оттаивание, а также ощутимое изменение температуры вечномерзлых грунтов ниже этого уровня.

Глубина, на которой годовые колебания затухают и температура грунтов в течение года не меняется, носит название глубины годовых нулевых амплитуд, а толща грунтов от поверхности до этой глубины называется слоем годовых колебаний температуры. Неизменная в течение года температура на подошве этого слоя — одна из важных характеристик температурного режима грунтов в естественных условиях.

В пределах слоя годовых колебаний температуры на каждом уровне существует среднегодовая температура. Она меняет свое значение при движении снизу вверх от температуры на глубине годовых нулевых амплитуд до среднегодовой температуры поверхности грунта. Очень часто это изменение невелико, и можно считать, что среднегодовая температура грунта ($t_{с. год}$) в пределах слоя годовых колебаний температуры постоянна по глубине и численно равна температуре на глубине годовых нулевых амплитуд. Поэтому эту последнюю температуру часто называют также среднегодовой температурой грунта. В дальнейшем изложении для обозначения описываемого понятия будет употребляться именно это название.

Среднегодовая температура грунта является показателем его энергетического состояния, что дает возможность использовать эту характеристику температурного режима для типизации инженерно-геологических мерзлотных условий. Она отличается достаточным постоянством в пределах однородных литолого-генетических комплексов грунтов. Температурный режим грунтов в целом зависит от их состава и свойств и определяется количеством тепла, поступающего в грунты. В свою очередь, теплооб-

мен через поверхность зависит от количества приходящей к поверхности энергии и определяется условиями теплообмена на ней. В среднегодовой температуре грунта отражается влияние всех этих факторов.

Количество приходящей к поверхности грунта энергии выражается радиационным балансом поверхности R_6 , а условия теплообмена на ней — ее тепловым балансом Q_6 . При прочих равных условиях именно эти величины определяют температурный режим вечномёрзлых грунтов, а следовательно, и их свойства. Приемы тепловой мелиорации мерзлых грунтов, т. е. управление их температурным режимом, основаны на целенаправленном изменении составляющих радиационного и теплового балансов поверхности грунтов. Поэтому краткие сведения о радиационно-тепловом балансе поверхности являются совершенно необходимыми для понимания процессов, происходящих в мерзлых грунтах.

Солнечная энергия поступает к поверхности в виде прямой Q и рассеянной атмосферой q световой коротковолновой радиации. В зависимости от цвета, экспозиции, микрорельефа, шероховатости поверхности грунта и характера растительности часть энергии отражается от этой поверхности и уходит в атмосферу. Отраженная энергия характеризуется альбедо α_1 поверхности*. Неотраженная лучистая энергия на поверхности грунта $(Q + q)(1 - \alpha_1)$ трансформируется в тепло. Но поверхность грунта не только получает энергию, но и сама излучает тепло в атмосферу. В свою очередь, атмосфера излучает тепло на поверхность грунта. Разность излучения грунта и противозлучения атмосферы положительна и называется эффективным излучением поверхности I . Эффективное излучение обусловлено тем, что температура Земли выше температуры окружающего пространства. Таким образом, общее количество лучистой энергии, поступающей на тот или иной участок поверхности грунта,

$$R_6 = (Q + q)(1 - \alpha_1) - I. \quad (1)$$

Это и есть радиационный баланс поверхности. Годовой радиационный баланс любого участка земной поверхности всегда положителен. В соответствии со степенью изменчивости характеристик поверхности и широтой местности различные участки грунта имеют различный радиационный баланс.

Но, характеризуя энергию, поступившую на поверхность грунта, радиационный баланс не определяет среднегодовой температуры грунта и вообще его температурного режима. Поступившая на поверхность грунта энергия расходуется на турбулентный теплообмен с атмосферой P и испарение (конденсацию) влаги на поверхности LM , характеризуя тепловой баланс этой

* Альбедо — коэффициент отражения поверхностью солнечных лучей.

поверхности:

$$R_0 = P + LM, \quad (2)$$

где L — скрытая теплота испарения (конденсации);

M — количество испарившейся (конденсировавшейся) влаги.

В общем случае количество приходящей на земную поверхность энергии равно количеству затраченной на этой поверхности энергии:

$$(Q + q)(1 - \alpha_1) - I = P + LM. \quad (3)$$

В соответствии с этой картиной теплообмена в грунте, в воздухе и на поверхности грунта в каждый момент времени формируются какие-то температуры, и, осредняя их, можно получить среднегодовые температуры воздуха, поверхности грунта и собственно грунта или годовой ход этих температур. Для простоты можно считать, что теплообмен происходит только по вертикали. Температуры воздуха, поверхности грунта и собственно грунта в любой момент времени или за любой промежуток осреднения находятся в динамическом равновесии. Любое изменение количества поступившей энергии или же характера ее распределения приводят к тому, что формируются новый равновесный теплообмен и новые средние температуры.

В геологической истории Земли бывали периоды, когда в силу тех или иных причин значительно уменьшалось количество солнечной радиации, попадающей на земную поверхность в целом или на отдельные ее участки. При этом изменение количества радиации могло быть таким, что она не компенсировала суммарных затрат тепла на поверхности, и этот дефицит восполнялся за счет отдачи тепла грунтами и понижения их температур. В условиях очень большого дефицита тепла на поверхности расход тепла грунтами становился значителен, и они замерзали. Когда подобные изменения радиационного баланса были достаточно длительны, образовывались мощные толщи вечномерзлых грунтов. Именно такие процессы привели к образованию громадных массивов вечномерзлых грунтов, занимающих ныне около 48% всей территории нашей страны.

Однако и в настоящее время, когда уровень солнечной радиации, получаемой теми или иными участками земной поверхности, относительно постоянен, наблюдаются локальные новообразования вечномерзлых грунтов, и, напротив, эти грунты иногда отепляются или даже оттаивают вовсе. Такие изменения температурного режима грунтов происходят в основном в результате хозяйственной деятельности человека, когда изменяются условия теплообмена на поверхности грунтов. Изменяется прежде всего альbedo поверхности вследствие уничтожения снега или его загрязнения, рубок леса, планировки поверхности и т. д. Изменяется также и величина эффективного излучения, так как меняются характеристики (мощность, плотность, время воздей-

ствия) теплоизолирующих покровов (растительности, снега) поверхности грунта. Резко меняется расход тепла в процессах теплового переноса (тепловой баланс).

Воздействие различных изменений на поверхности грунта на его температурный режим может быть многообразным, противоположно направленным, и результирующая всех этих изменений не всегда может быть оценена даже качественно.

Наиболее ясным представляется воздействие на температурный режим грунтов непосредственно зданий и сооружений. В большинстве случаев они являются отапливаемыми и постоянно вносят в грунт определенные количества тепла. В начальный период эксплуатации влияние зданий и сооружений достаточно существенно меняет температурный режим грунтов. В плане эти изменения обычно локализованы. По прошествии некоторого времени с начала эксплуатации температурный режим грунтов стабилизируется и устанавливаются новые равновесные их температуры на различных участках в плане и в различных зонах по глубине.

Однако влияние зданий и сооружений тоже не всегда бывает таким определенным. Например, иногда неясно, на какую глубину и как долго будет происходить оттаивание грунтов под влиянием отапливаемых зданий. Если здания эксплуатируются с холодными подпольями, то в зависимости от ряда причин температура грунтов оснований может как понижаться, так и повышаться. Неотапливаемые здания в разных климатических и инженерно-геологических мерзлотных условиях могут совершенно различно влиять на температурный режим грунтов.

В отличие от глобальных изменений радиационного баланса, когда меняется температура не только грунта и его поверхности, но и воздуха, локальные изменения температуры грунтов на температуру воздуха заметно не влияют. Температура воздуха в районе застройки может, конечно, измениться, но не в результате восстановления нарушенного динамического равновесия теплообмена «воздух — грунт», а, например, за счет непосредственного влияния строительства на газовый состав воздуха и появления парникового эффекта. Но изменение температуры воздуха при этом обязательно выведет температуру грунта на новый равновесный уровень, соответствующий изменившемуся теплообмену.

§ 2. СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ И РАЙОНОВ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

Вечномерзлые грунты обладают следующими специфическими особенностями, которые надо специально учитывать при инженерно-геологических изысканиях:

а) в них содержится лед;

б) грунты сезоннопромерзающего и сезоннооттаивающего слоев характеризуются повышенной способностью к пучению при промерзании;

в) изменение условий теплообмена на поверхности вечномерзлых грунтов приводит к изменению их физических, теплофизических и механических свойств вследствие изменения температурного режима грунтов*.

Каждая из этих особенностей вечномерзлых грунтов существенно отличает их от талых, требует совершенно иного подхода при проектировании оснований и фундаментов. Эти особенности надо учитывать при инженерно-геологических изысканиях.

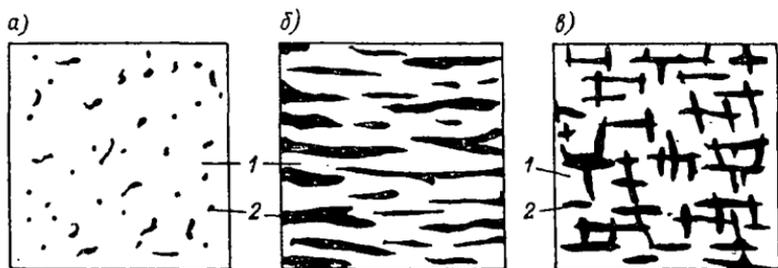


Рис. 1. Криогенная текстура мерзлых грунтов
а — массивная; б — слончатая; в — сетчатая; 1 — минеральная часть грунта;
2 — лед

а) Весьма важное значение приобретает определение различных категорий льда в мерзлых грунтах. Генетическая классификация подземных льдов П. А. Шумского не всегда дает возможность учитывать своеобразие влияния подземных льдов на прочностные и деформационные свойства мерзлых грунтов. В связи с этим СНиП II-Б.6—66 выделяет лишь две категории: лед-цемент (поровый лед) и лед включений**. Понятия льда-цемента совпадают в обеих классификациях. К ледяным включениям СНиП относит те виды конституционных льдов, которые образуют криогенные текстуры грунтов (рис. 1).

Все прочие виды льдов СНиП II-Б.6—66 не классифицируются, поскольку использование их в качестве оснований не нормировано. Отсюда вытекает необходимость выделения таких льдов (т. е. большую часть инъекционных, а также всех пещерно-жильных и погребенных) в особую группу. При изысканиях такие участки надо выделять в качестве неблагоприятных для строительства. Критерием для их выделения будет служить наличие в пределах этих участков макроформ подземных льдов.

* Имеются в виду дисперсные грунты, т. к. массивные грунты приведенными свойствами не обладают.

** Ледяные тела, формирующиеся при промерзании грунтов, являются не включениями, а новообразованиями (прим. науч. ред.).

Характер влияния выделенных СНиПом категорий льда различен. Это обуславливает необходимость их раздельного рассмотрения. Различия связаны с тем, что лед-цемент и ледяные включения в принципе образуются из разных видов воды в грунтах и при разных отрицательных температурах. Можно считать, что ледяные включения появляются при замерзании свободной воды *, тогда как лед-цемент — в основном из связанной. Процесс замерзания воды в грунтах в общем случае начинается с 0°C . При этом происходит некоторое переохлаждение свободной грунтовой влаги, т. е. понижение ее температуры, после чего начинается образование льда, сопровождающееся повышением температуры (за счет выделения теплоты фазовых превращений воды) до 0°C или близких к 0°C отрицательных температур. При замерзании свободной влаги льдовыделение начинается в порах грунта, но вследствие процессов миграции свободная влага в основном образует сегрегационные формы льда. Дальнейшее понижение температуры грунта сопровождается образованием льда в порах грунта за счет связанной воды.

Таким образом, при 0°C или близких к 0°C отрицательных температурах образуются некоторое незначительное количество льда-цемента и все ледяные включения. При этих температурах прочностные и деформационные свойства мерзлых грунтов обусловлены главным образом количеством ледяных включений и характером их расположения между частицами или агрегатами частиц грунта. Повышение прочности мерзлого грунта сравнительно с талым при образовании ледяных включений происходит скачкообразно. При дальнейшем понижении температуры постепенно замерзают различные слои связанной воды в порах грунта, образуя лед-цемент. Температура замерзания этих слоев воды зависит от их расстояния до поверхности частиц грунта, понижаясь по мере приближения к этой поверхности.

Практически в дисперсных грунтах, исключая сортированные пески, при любых естественных отрицательных температурах всегда содержатся как лед-цемент, так и незамерзшая связанная вода, соотносительные количества которых меняются при изменении отрицательной температуры грунта (рис. 2). Понятно, что при этом меняются и механические свойства мерзлого грунта, в значительной мере обуславливаемые смерзанием частиц грунта при выделении льда-цемента, образующего сильные цементационные связи между частицами грунта. Роль ледяных включений в цементировании частиц грунта крайне невелика, хотя включения сами по себе образуют достаточно прочные прослойки. Но при образовании ледяных включений происходит раздвигание частиц грунта, и в зависимости от характера льдовыделения в той или иной мере нарушается его сплошность.

* Сегрегационное льдоотделение происходит в ходе миграции к промерзающему слою очень рыхлосвязанной воды (прим. науч. ред.)

Можно предположить, что в целом наличие ледяных включений при прочих равных условиях снижает прочность грунта. Степень снижения прочности зависит от характера расположения ледяных включений в грунте, т. е. от криогенной структуры грунта.

Большее количество ледяных включений приводит также к снижению прочности грунта в большей степени еще и по другой причине — за счет более интенсивного проявления реологических свойств, выражающихся в деформации ползучести. Наличие в мерзлых грунтах цементирующего льда (и структурных связей) обуславливает их напряженное состояние. В случае приложения к мерзлым грунтам нагрузки в них появляются допол-

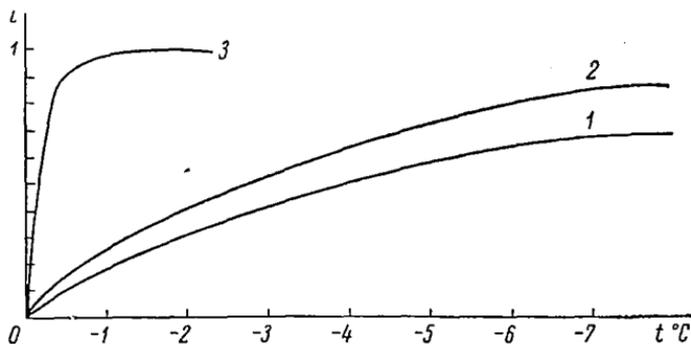


Рис. 2. Зависимость относительной льдистости от температуры грунта

1 — суглинки средние; 2 — пески тяжелые; 3 — пески среднезернистые сортированные

нительные напряжения, вызывающие плавление части льда в наиболее напряженных зонах. Приложение постоянной нагрузки приводит по этой причине к появлению устойчивых деформаций ползучести. Однако для каждой разновидности грунтов при определенных температуре и льдистости существует предельная нагрузка, при воздействии которой в течение неопределенно большого времени деформации ползучести в этом грунте затухают. Превышение этой нагрузки приводит к развитию незатухающей ползучести. Такие нагрузки характеризуют предел длительной прочности мерзлых грунтов. При прочих равных условиях предел длительной прочности меньше у грунтов с большим содержанием ледяных включений и у грунтов с более высокой отрицательной температурой, т. к. в последнем случае в них меньше льда-цемента и больше незамерзшей воды. Понятно также, что само по себе наличие незамерзшей воды в мерзлых грунтах независимо от их температуры приводит при наложении нагрузок к появлению ползучести.*

* Для детального ознакомления с природой прочности и ползучести мерзлых грунтов следует обратиться к исследованиям С. С. Вялова и его сотрудников [30].

Все эти обстоятельства заставляют во время изысканий, во-первых, отдельно определять количества льда-цемента, незамерзшей воды и ледяных включений в мерзлых грунтах и, во-вторых, предельно-длительные значения их сопротивления внешним усилиям, т. е. нагрузкам.

б) Повышенная склонность к пучению грунтов, залегающих в слое сезонного оттаивания или промерзания над кровлей вечномерзлых грунтов, обусловлена следующим: кровля вечномерзлых грунтов является водоупором для инфильтрующихся в грунты атмосферных, талых и других поверхностных вод, что приводит к переобогащению влагой сезоннооттаивающего или сезоннопромерзающего слоев. В некоторых случаях при этом формируются сезонные или постоянные горизонты надмерзлотных вод.

При промерзании таких переувлажненных грунтов, а особенно при подтоке влаги к фронту промерзания за счет надмерзлотных вод, процессы пучения проявляются весьма интенсивно. Происходит пучение за счет увеличения объема воды при ее переходе в лед. Понятно, что миграция влаги к фронту промерзания и дает основную долю приращения объема грунта. Например, постоянный подток воды к фронту промерзания создает возможность образования гигантских многолетних бугров пучения с мощными ледяными ядрами. Причем в этом случае источником питания могут служить напорные воды промерзающих водоносных горизонтов, аллювиальный поток или водоемы. При постоянном и интенсивном подтоке влаги к фронту промерзания положение последнего обычно стабилизируется.

В грунтах возникают дополнительные напряжения, связанные с увеличением объема воды при ее переходе в лед. В начальный период промерзания, когда суммарные напряжения в грунтах невелики и не превышают в целом сил сцепления в них, температура замерзания грунтовой влаги несколько понижается и происходит переохлаждение этой влаги. При последующем понижении температуры напряжения в грунтах возрастают и с некоторого момента превышают силы сцепления. Это сопровождается интенсивным льдовыделением и разуплотнением, т. е. пучением грунтов. Такое представление, разумеется, схематично, но дает возможность ввести понятие о некоторой пороговой силе начала пучения и достаточно просто связать ее с составом и свойствами грунта.

В естественных условиях иногда образуются сезонные и многолетние бугры пучения, могут происходить послойная дифференциация и выпучивание на поверхность грунта обломочного материала. Процессы промерзания грунта могут привести к деформациям дорожного полотна, аэродромных покрытий, подземных инженерных коммуникаций, выпучиванию фундаментов, различных опор и т. п.

Различают нормальные и касательные силы пучения. Нормальные силы проявляются при промерзании грунта, расположенного под подошвой фундамента. Увеличение объема этого грунта приводит к поднятию фундамента, т. е. сила действует нормально к подошве фундамента. В тех случаях, когда промерзают грунты, прилегающие к фундаменту сбоку, происходит их смерзание с боковой поверхностью фундамента. Одновременно за счет пучения происходит перемещение смерзшихся с фундаментом слоев грунта вверх, и фундамент перемещается вместе с ними. Поскольку эта сила, направленная вверх, приложена к фундаменту вдоль его боковой поверхности, ее называют касательной силой пучения. Таким образом, и нормальная и касательная силы пучения направлены вверх и различаются по характеру воздействия на предмет, помещенный в промерзающий грунт.

Принято считать, что нормальная сила пучения больше касательной. Это представление основано на том, что у обычных зданий и сооружений нагрузки на грунт не могут компенсировать напряжений, развивающихся под подошвой фундаментов при промерзании грунта, что приводит к выпучиванию фундаментов. Касательная же сила пучения лимитируется величиной смерзания промерзшего грунта со стенкой фундамента. Если эта сила невелика, то произойдет срыв грунта со стенки фундамента, и фундамент останется на месте.

Практически считается, что промерзание влажного грунта под подошвой фундаментов неизбежно приводит к их выпучиванию за счет воздействия нормальной силы пучения и поэтому такое промерзание должно быть исключено. Смерзание влажных грунтов с боковой стенкой фундаментов можно допустить, т. к. касательные силы пучения в принципе компенсируются другими силами, направленными вниз.

С целью нейтрализации вредного воздействия пучения на здания и сооружения необходимо при изысканиях устанавливать глубины сезонного промерзания и оттаивания грунтов, способность их к пучению, а также условия их увлажнения. Должны определяться величины касательной силы пучения в зависимости от условий промерзания и силы смерзания грунта с фундаментами. Определять указанные характеристики нужно для условий строительства и эксплуатации проектируемых объектов. Вопросы механики мерзлых грунтов и условий их совместной работы со зданиями и сооружениями рассматриваются в работах Н. А. Цытовича [41].

в) Распределение тепловой энергии в грунтах происходит в зависимости от их теплоемкости, теплопроводности, количества скрытых теплот в единице объема грунта. Поскольку грунты отличаются неоднородностью состава и изменчивостью свойств, понятно, что если бы даже через поверхность грунтов проходили равные количества тепла на всех ее участках, то те-

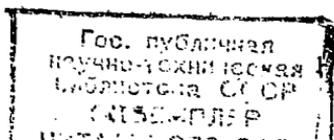
пловой потенциал (температура) различных участков не был бы одинаков. Но на разных участках поверхности через нее проходят неодинаковые количества тепла. Поэтому в соответствии с изменчивостью свойств грунтов, а также условий теплообмена на поверхности в различных точках разреза в один и тот же момент времени формируются разные температуры. Различие температур обуславливает существование в грунтах постоянного теплообмена. Хотя в основном тепловые потоки направлены по вертикали, т. к. именно в этом направлении устанавливаются наибольшие градиенты температур, боковые тепловые потоки, вызванные неоднородностью грунтов и условий теплообмена на их поверхности, иногда также могут быть достаточно велики.

Даже незначительное изменение условий теплообмена на каком-либо участке поверхности грунта и количества проходящего через поверхность тепла изменит тепловой режим грунта. Локальные изменения условий теплообмена обычно вызывают незначительные и локализованные изменения температурного режима грунта.

При строительном освоении территории изменение условий теплообмена на поверхности грунтов обычно становится правилом. Вырубка леса и уничтожение прочей растительности, уборка и уплотнение снега, планировка территории, устройство насыпей, подсыпок, отмосток, строительство зданий и сооружений — все это резко изменяет естественный температурный режим грунтов. Поэтому важнейшей задачей инженерно-геологических изысканий является прогнозирование изменений температурного режима грунтов в зависимости от изменений условий теплообмена на их поверхности.

Изменение отрицательной температуры мерзлого грунта влияет на количество в нем льда-цемента. Это, в свою очередь, приводит к изменению всех свойств мерзлого грунта и особенно прочности, теплоемкости и теплопроводности, что необходимо учитывать в процессе проектирования.

При повышении температуры мерзлого грунта до температуры его оттаивания, соответствующей температуре его замерзания (0°C или близкие к 0°C отрицательные температуры), происходит оттаивание ледяных включений, а также оставшейся части льда-цемента, образовавшегося из свободной воды. При этом существенно ухудшаются прочностные и деформационные характеристики оттаявшего грунта. Как правило, эти характеристики хуже, чем у талого грунта, аналогичного по составу, т. к. в оттаявшем грунте структурные связи сильно ослаблены. Таким образом, оттаивание грунта резко, скачкообразно изменяет его физические, теплофизические и механические свойства, главным образом за счет превращения льда в воду, а также из-за перераспределения влажности и изменения объемного веса грунта при оттаивании.



При изменении отрицательных температур мерзлого грунта, напротив, имеет место плавное изменение свойств. Такое своеобразие в изменении свойств и количественная характеристика изменений зависят от содержания в грунтах различных категорий льда, а также связанной воды. Поэтому при инженерно-геологических изысканиях необходимо определять вероятный диапазон изменений температур грунтов оснований в связи со строительством, т. е. прогнозировать их температурный режим на весь период эксплуатации проектируемых зданий и сооружений. Должны также прогнозироваться изменения свойств грунтов в этом диапазоне температур.

Однако дополнительные требования, предъявляемые к изысканиям в районах распространения вечномерзлых грунтов, этим не исчерпываются. Имеется ряд особенностей, присущих таким районам, которые вынуждают подходить с особой осторожностью к выбору там площадок для размещения проектируемых объектов. Одной из таких особенностей является широкое развитие мерзлотных физико-геологических процессов и явлений, обусловленное непрерывным изменением температурного режима грунтов, их промерзанием, оттаиванием и деформациями, деятельностью грунтовых и поверхностных вод и некоторыми другими причинами.

Перечень этих процессов и явлений может быть достаточно велик, т. к. между некоторыми из них существуют тонкие генетические или морфологические различия, позволяющие выделять новые их разновидности. Классификация мерзлотных физико-геологических процессов также достаточно сложна ввиду их комплексного характера.

Безусловно опасными для строительства зданий и сооружений являются участки развития термокарста; термоэрозии; сезонных бугров пучения; многолетних бугров пучения; оползней, сплывов, обвалов; солифлюкционных форм рельефа; морозобойных трещин; подземных льдов; наледей.

Термокарст представляет собой отрицательные формы рельефа, образовавшиеся при вытаявании подземных льдов или льдистых грунтов. Современные термокарстовые образования встречаются обычно в виде озер, имеют неправильную форму, наследующую форму залегания вытаявших подземных льдов (форма более древних термокарстовых озер характеризуется плавной береговой линией). Часто это зарастающие озера. Иногда древние термокарстовые образования представлены обширными уплощенными понижениями замкнутой формы с заболоченной или сырой поверхностью (аласы) или же системой сглаженных грунтовых бугров (байджерахи).

Термоэрозионные процессы в отличие от термокарстовых сопровождаются перемещением оттаивающего грунта. Поэтому в рельефе они проявляются обычно в форме вытянутых по уклону понижений, прямых или ломаных, так называе-

рых полос стока. Термоэрозионные формы часто закладываются по морозобойным трещинам. Термокарстовые и термоэрозионные формы, как правило, ассоциируют друг с другом (полосы стока впадают в термокарстовые озера, лежащие в понижениях рельефа).

Термокарстовые и термоэрозионные процессы очень часто сопровождаются противоположными — образованием многолетних бугров пучения (гидролакколитов). Такие процессы развиты обычно на обширных водораздельных пространствах.

Бугры пучения образуются также в долинах небольших водотоков. Термоэрозия, кроме того, часто отмечается на склонах речных долин. Многолетние бугры пучения образуются при условии подпитки промерзающего грунта поверхностными или грунтовыми водами, и размеры таких бугров могут быть значительными.

Сезонные бугры пучения образуются в результате неравномерного промерзания переувлажненных грунтов слоя сезонного оттаивания (сезонного промерзания). Образование этих бугров, как правило, происходит только за счет влаги, содержащейся в промерзающих грунтах. Размеры бугров не превышают обычно 0,2—0,3 м в высоту и 0,7—1,0 м в поперечнике.

Оползни, сплывы и обвалы образуются на склонах в результате оползания, сплывания или обрушения переувлажненных оттаявших грунтов по кровле вечномерзлых грунтов.

Солифлюкционные формы рельефа возникают при накоплении на склонах и у их подножий грунтов, перемещенных процессами солифлюкции — гравитационного течения переувлажненного грунта в результате периодического его поднятия при промерзании и осадки при оттаивании. Солифлюкционные формы рельефа сложены переувлажненным грунтом, часто обладающим тиксотропными свойствами, иногда содержат гумусированные горизонты погребенных почв.

Морозобойные трещины образуются в результате промерзания талых или понижения температуры мерзлых грунтовых массивов, когда при этом происходит уменьшение их объема, сопровождаемое нарушением сплошности грунтов. Морозобойные трещины развиваются обычно на оголенных участках с незначительным растительным и снежным покровами.

К мерзлотным физико-геологическим явлениям относят также макроформы подземных льдов, т. е. пещерно-жилые, погребенные и инъекционные льды. С ними часто ассоциируют термокарстовые и термоэрозионные формы.

На леде представляют собой слои льда на дневной поверхности, образующиеся при замерзании изливающихся на эту поверхность вод. Обычно они появляются при замерзании изливающихся вод источников или же при прорыве вод из-под речного льда, покрывая при этом поймы рек. Иногда выделяют

«подземные» наледь, образованные внедрившимися в мерзлые грунты водами. Такие наледь относятся к подземным льдам.

Мерзлотные физико-геологические процессы и явления достаточно детально описаны в литературе [например, 8, 9, 27]. Они представляют наглядную форму действия сложных термодинамических процессов, обусловленных различными естественно-историческими факторами. Хозяйственная деятельность человека также может привести к возникновению некоторых видов таких процессов. Поэтому наряду с четким выделением площадей, где уже развиты мерзлотные физико-геологические процессы и явления, необходимо учитывать возможности и условия проявления этих процессов на остальных территориях.

Своеобразным процессом, возникающим при застройке участков несливающейся мерзлоты, является образование грунтовых наледей, связанных с полным или частичным промерзанием надмерзлотных вод. Промерзая, надмерзлотные воды становятся напорными. Если на этих участках грунты под зданиями не промерзают, то напорные воды устремляются в талые грунты оснований, изливаются на поверхность и замерзают, разрушая здания. Аналогичный эффект отмечается, если чаша оттаивания под зданием распространится до любого напорного водоносного горизонта. Участки, где возможно образование грунтовых наледей, опасны для размещения тепловыделяющих объектов строительства.

Грунтовые наледь образуются также при вскрытии горизонтов грунтовых вод земляными работами в зимнее время. Эти участки приурочены, как правило, к речным долинам, т. к. образование несливающейся мерзлоты связано с деятельностью руслового или аллювиального потока. Долины же рек в северных районах являются, как известно, местами наиболее интенсивного заселения, поскольку реки часто бывают единственными путями сообщения и источниками водоснабжения. При выборе площадок строительства это обстоятельство также нужно учитывать.

В целом же специфические особенности вечномерзлых грунтов и районов их распространения определяют необходимость исследования при изысканиях на мерзлоте гораздо более широкого, чем на талых грунтах, комплекса природных условий строительства.

Природные условия, которые необходимо иметь в виду при проектировании строительства в районах распространения вечномерзлых грунтов; обычно называют инженерно-геокриологическими (ИГК) или инженерно-геологическими мерзлотными (ИГМ) условиями строительства. В настоящей работе принято последнее наименование. Под ИГМ условиями следует понимать совокупность геологических и географических факторов какой-либо территории (площадки), расположенной в области распространения вечномерзлых грунтов, определяющих качественно и

количественно характер взаимодействия зданий и сооружений, проектируемых, строящихся и эксплуатируемых на этой территории (площадке), с грунтами их оснований. При изысканиях для различных видов строительства и для разных стадий проектирования определяются различные комплексы ИГМ условий строительства.

§ 3. ЗАДАЧИ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗЫСКАНИЙ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Инженерно-геологические изыскания должны обеспечить получение всех необходимых составляющих ИГМ условий, используемых для расчета оснований и фундаментов, а также гарантировать определенную степень надежности этих составляющих.

Методы изучения некоторых ИГМ условий, в частности прочностных свойств мерзлых грунтов, используемых при расчете оснований и фундаментов, ввиду большой сложности и трудоемкости не могут быть применены при стандартном уровне изысканий, проводимых обычными изыскательскими организациями. Поэтому в СНиП II-Б. 6—66 приведены таблицы значений прочностных свойств мерзлых грунтов, которыми и пользуются для расчета оснований и фундаментов. Табличные значения поставлены в зависимость от температуры и состава грунтов и надежны при определенных ограничениях по количеству ледяных включений и солевому составу грунтов. Без этих ограничений пользоваться таблицами нельзя, а следовательно, нельзя и определить эти значения надежно.

Инженерно-геологические условия участков, характеризующихся более высокими по сравнению с нормированными значениями льдистости и засоленности, поэтому следует признать неблагоприятными (при использовании оснований в вечномерзлом состоянии). Кроме того, участки, где развиты физико-геологические процессы и явления и где возможно появление грунтовых наледей, опасны для строительства большинства видов зданий и сооружений. Опасность заключается в том, что на таких участках заведомо не гарантируется устойчивость зданий и сооружений или чрезвычайно велика вероятность деформаций грунтов оснований, намного превышающих допустимые деформации конструкций зданий и сооружений.

Иногда высказывается суждение о технической возможности надежного строительства в любых ИГМ условиях, в том числе на участках, которые следует относить к неблагоприятным или опасным. Не отрицая такой возможности в принципе, следует заметить, что фактические данные свидетельствуют о наличии деформаций зданий и сооружений, выстроенных в неблагоприятных ИГМ условиях в подавляющем большинстве случаев. Такая возможность может быть реализована при условии проведения специальных нестандартных исследований при изысканиях,

а на их основе — проектирования особо надежных оснований и фундаментов и соответствующих эксплуатационных мероприятий. Весь этот комплекс обязательно приводит к резкому удорожанию и удлинению сроков строительства. Поэтому в обычных случаях участков с неблагоприятными и опасными ИГМ условиями, конечно, следует избегать.

В рамках общей задачи инженерно-геологических изысканий, указанной выше, первоочередной работой является выделение на местности (и в отчетных картографических материалах) участков с опасными или неблагоприятными ИГМ условиями строительства. Необходимость дифференцированного подхода к таким участкам обусловлена тем, что комплекс опасных условий в основном стабилен, тогда как неблагоприятные ИГМ условия могут меняться. Во-первых, для разных видов зданий и сооружений неблагоприятные ИГМ условия различны — они зависят от тепловыделения, нагрузок на грунты, предполагаемого характера теплового взаимодействия фундаментов и оснований. Во-вторых, по мере совершенствования методов определения свойств грунтов в мерзлом состоянии и других составляющих ИГМ условий, используемых при расчете оснований и фундаментов, могут уменьшаться или вообще сниматься ограничения по льдистости и засоленности грунтов.

Например, засоленные свыше 0,25% грунты будут неблагоприятны при строительстве с сохранением вечномерзлого состояния, т. к. обычным путем нельзя определить их прочностные свойства, и, кроме того, эти свойства будут хуже, чем у обычных мерзлых грунтов. Если же на засоленных грунтах строительство ведется без сохранения вечномерзлого их состояния, то участки их распространения по признаку засоленности к неблагоприятным отнести нельзя. Повышенная льдистость грунтов при сохранении их вечномерзлого (твердомерзлого) состояния неблагоприятна для применения всех типов фундаментов, кроме свайных, для которых она в общем не имеет особого значения. Подобные примеры можно умножить.

Опасные и неблагоприятные участки при изысканиях определяют по-разному. Выделение опасных участков в целом не требует проведения трудоемких работ. Неблагоприятные же участки выделяют на основе анализа ИГМ условий, определяемых с помощью буровых, геофизических, лабораторных и других работ. Анализ ИГМ условий позволяет выделить не только неблагоприятные, но и благоприятные участки. В зависимости от характера будущих зданий и сооружений, а также их взаимодействия с грунтами оснований участки с благоприятными для строительства ИГМ условиями для разных зданий и сооружений будут различны [13]*.

* В некоторых случаях выделение определенных типов заведомо благоприятных участков в предварительном порядке возможно и без постановки трудоемких работ.

Таким образом степень благоприятности участков для строительства нельзя рассматривать в отрыве от конкретных зданий и сооружений, при проектировании которых ведутся изыскания. Однако опыт показывает, что можно, базируясь только на ИГМ условиях, выделить абсолютно лучшие участки для размещения площадки или трассы строительства.

После выбора площадки (трассы) изыскания должны обеспечить размещение на ней зданий и сооружений в зависимости от их характеристики и ИГМ условий площадки (трассы), получение материалов, необходимых для проектирования на ней оснований и фундаментов. Поскольку ИГМ условия в пределах площадки (трассы) обычно обладают изменчивостью, а характеристики проектируемых объектов, как правило, различны, площадка (трасса) для оптимального размещения в ее пределах зданий и сооружений должна быть районирована по ИГМ условиям. Вот почему следующей задачей изысканий является инженерно-геологическое районирование выбранной площадки (трассы) и разработка рекомендаций по размещению на ней зданий и сооружений на основе их характеристик. При этом должны быть также рекомендованы и технические решения оснований и фундаментов зданий и сооружений с учетом предполагаемого их размещения. Рекомендации по техническим решениям оснований и фундаментов могут быть разработаны лишь на основе прогнозирования изменений ИГМ условий, в частности температурного режима грунтов, которые произойдут при строительстве и эксплуатации проектируемых зданий и сооружений. Поэтому после районирования площадки по каждому из выделенных участков прогнозируют ИГМ условия. Ввиду технической сложности эту работу в отдельных случаях целесообразно выполнять совместно с проектной организацией.

После того, как на основе всех предшествующих материалов изысканий проектной организацией осуществлена привязка зданий и сооружений и разработаны технические решения их оснований и фундаментов (технический проект), изыскания проводятся на конкретных участках размещения зданий и сооружений. Цель этих изысканий — получение комплекса ИГМ условий, необходимого для проектирования оснований и фундаментов в соответствии с техническим проектом. Поскольку инженерно-геологические изыскания выполняются для обеспечения исходными материалами конкретных стадий проектирования, задачи изысканий и последовательность их решения конкретизируются исходя из задач проектирования на каждой стадии.

Для промышленного и сельскохозяйственного строительства установлены две стадии проектирования (которые в некоторых случаях объединяются): 1) технический проект; 2) рабочие чертежи. Во всех случаях предварительно разрабатывается технико-экономическое обоснование строительства (ТЭО). В частности, обосновывается

размещение объектов строительства, причем в некоторых случаях конкурирующими могут оказаться не только площадки, но и различные географические пункты. Выбор того или иного пункта для строительства производится на основе технико-экономического анализа и сопоставления множества различных факторов, в том числе оцениваются и ИГМ условия территории.

Как правило, роль ИГМ условий при выборе места строительства скромна, но иногда она становится решающей. Это происходит, когда ИГМ условия ряда участков территории опасны для строительства. При разработке ТЭО ИГМ условия определяют лишь техническую возможность строительства, не оказывая, по существу, заметного влияния на его экономику. Поэтому инженерно-геологические изыскания для ТЭО проводятся обычно лишь в тех случаях, когда возникают определенные сомнения по этому поводу. Что касается инженерно-геологических изысканий для ТЭО строительства крупных промышленных комплексов в районах распространения вечномерзлых грунтов, то они, как правило, производятся. Основной задачей изысканий при этом должно быть выделение как участков, опасных для строительства, так и благоприятных в этом смысле площадей.

Проведение инженерно-геологических изысканий для ТЭО строительства линейных сооружений, как правило, нецелесообразно, т. е. все задачи полностью разрешаются при изысканиях для стадий технического проекта и рабочих чертежей.

При изысканиях для ТЭО часто приходится обследовать значительные площади, сроки же и стоимость работ должны находиться в разумных пределах. Поэтому обычно применяют ускоренные методы оценки территории, требующие относительно небольших объемов сравнительно нетрудоемких работ. Обычно эти изыскания позволяют оконтурить небольшую территорию, благоприятную для выбора площадки строительства или же определить варианты площадок.

В техническом проекте промышленных и сельскохозяйственных зданий и сооружений должны быть определены, в частности, генеральный план размещения зданий и сооружений (ось трассы линейных сооружений) и технические решения оснований и фундаментов. Степень разработки этих решений должна быть достаточной для расчета в основном стоимости строительных работ нулевого цикла.

Перед разработкой технического проекта могут быть известны: 1) территория, которая отведена для выбора площадки строительства; 2) варианты площадок или 3) единственная площадка. Задачей изысканий в первом случае является оценка территории строительства, выбор наилучшей площадки, изучение ИГМ условий на выбранной площадке и их типизация. Во втором случае сравниваются ИГМ условия имеющихся площадок и проводятся работы на выбранной площадке. В случае, когда задана единственная площадка, изучаются ее ИГМ усло-

вий и производится их типизация. Заключается типизация в выделении участков площадки (трассы), характеризующихся однородностью тех или иных составляющих ИГМ условий, обеспечивающей возможность единых технических решений оснований и фундаментов в пределах выделенного участка. Таким образом, типизация ИГМ условий площадки (трассы) сводится к районированию по этим условиям. Каждый выделенный при районировании участок характеризуется средними значениями (пределами изменения) составляющих ИГМ условий, необходимых для проектирования оснований и фундаментов. Районирование площадки (трассы) позволяет наилучшим образом по сравнению с прочими методами произвести размещение зданий и сооружений (определить положение оси линейного сооружения) на участках с оптимальными для них ИГМ условиями и разработать типизированные технические решения оснований и фундаментов.

Перед составлением рабочих чертежей инженерно-геологические изыскания проводятся на участках конкретных зданий и сооружений или по оси линейных сооружений, предусмотренных генпланом, с целью определения составляющих ИГМ условий, необходимых для расчетов оснований и фундаментов, предусмотренных техническим проектом.

Проектирование жилищного и гражданского строительства населенных мест подразделяется на разработку генерального плана (проект планировки — ПП), проекта детальной планировки (ПДП) и проекта застройки (ПЗ) населенных мест. Проект застройки, в свою очередь, состоит из технического проекта и рабочих чертежей.

Генеральный план разрабатывается для размещения всех видов застройки населенного пункта в целом без учета конструктивных особенностей зданий и сооружений и без их привязки. Проект детальной планировки разрабатывается для отдельных частей населенных пунктов (центра, квартала, микрорайона, жилой зоны и т. п.), выделяемых по тому или иному признаку. Проект детальной планировки также не учитывает особенностей зданий и сооружений и не определяет их конкретной привязки.

Задачи проектирования при разработке технического проекта и рабочих чертежей в целом аналогичны задачам проектирования для промышленного и сельскохозяйственного строительства на этих же стадиях.

Цели изысканий для генплана и ПДП на первый взгляд не отличаются друг от друга. В том и другом случае должны быть выделены участки с неблагоприятными ИГМ условиями строительства. На остальной территории генпланом будет предусмотрено размещение жилых и промышленных зон, транспортных магистралей и т. п. При составлении ПДП должно быть детализировано размещение строительства в пределах четко выделенных

генпланом зон, кварталов и т. д. Внутри зон могут существовать какие-либо габаритные границы, также обусловленные генпланом. ПДП разрабатывается с учетом этих ограничений и внутри свободной площади определяет размещение застройки, т. е. в первую очередь взаимное расположение различных зданий и сооружений. Несмотря на то что ПДП не определяет конкретных участков их размещения, следует признать, что площадь, в пределах которой возможна привязка того или иного здания (сооружения), ограничена. Это следует из условий комплексности застройки и определенного взаимного размещения зданий и сооружений. Таким образом, резервы площади для перемещения тех или иных зданий и сооружений после разработки ПДП невелики.

Участок, для которого составляется ПДП, аналогичен площадке промышленного (сельскохозяйственного) строительства. Для таких площадок, когда на них ведутся изыскания для технического проекта, т. е. когда их генплан еще не составлен, нормативные документы [38] предусматривают обязательное наличие резерва территории, обеспечивающего возможность подвижек зданий и сооружений в зависимости от их характеристик и инженерно-геологических мерзлотных условий тех или иных участков площадки. При наличии особых условий взаимного размещения зданий и сооружений, т. е. как в нашем случае, размеры площади, на которой проводятся изыскания, могут увеличиваться в 2 раза по сравнению с размерами ее при наиболее компактной застройке.

Следует отметить, что при изысканиях для промышленного и сельскохозяйственного строительства увеличенные до 1,5—2 раз размеры площадок устанавливаются только при их выборе, проводимом с помощью буровых, геофизических, термокаротажных и других видов инженерно-геологических работ.

Аналогично этому размеры участка изысканий для зоны (микрорайона, квартала), для которой составляется ПДП застройки, должны быть вдвое больше участка наиболее компактной (с учетом соответствующих норм) застройки такой зоны (микрорайона, квартала), т. е., по сути дела, вдвое больше территории, отводимой для этой зоны генеральным планом. Для промышленного и сельскохозяйственного строительства такое увеличение площади их возможного размещения по сравнению с наиболее компактной застройкой, обеспечивающее наиболее надежное расположение зданий и сооружений в зависимости от ИГМ условий, обычно не представляет трудностей, т. к. в районах распространения вечномерзлых грунтов какие-либо территориальные ограничения крайне редки. Для участков жилищного и гражданского строительства, размеры которых ограничиваются генпланом, положение более сложное. В данном случае следует либо уменьшить указанный резерв территории, либо генплан должен предусматривать увеличенные размеры зон раз-

личных видов застройки, либо неблагоприятные по ИГМ условиям участки должны быть известны при составлении генплана.

Уменьшение размеров резерва территории вряд ли может быть оправданным, т. к. его наличие гарантирует привязку зданий и сооружений в наиболее благоприятных местах. Размеры резерва установлены исходя из опыта работ и не являются завышенными. Увеличение вдвое общей площади застройки населенного пункта, т. е. площади, на которую разрабатывается генплан, приведет к удорожанию строительства. Следовательно, перед составлением генплана или аналогичных по содержанию материалов изыскания должны обеспечить выделение не только опасных, но и благоприятных для строительства участков. В этом случае инженерно-геологические работы будут близки к работам по выбору площадки для промышленного и сельскохозяйственного строительства, изыскания для ПДП могут и не проводиться, а изыскания для технического проекта и рабочих чертежей будут аналогичны изысканиям для соответствующих стадий проектирования промышленного и сельскохозяйственного строительства, кроме выбора площадки.

* * *

Рассмотрев задачи и последовательность выполнения инженерно-геологических изысканий для промышленного, сельскохозяйственного, жилищного и гражданского строительства, можно обобщить их следующим образом:

а) во всех случаях при изысканиях должна производиться инженерно-геологическая оценка территории с целью выбора оптимальной по ИГМ условиям площадки (или трассы);

б) выбранная площадка или трасса районировается по ИГМ условиям, которые должны определяться с детальностью, обеспечивающей размещение проектируемых зданий и сооружений в ее пределах и технические решения оснований и фундаментов;

в) на участках размещения конкретных зданий и сооружений определяются ИГМ условия, обеспечивающие проектирование оснований и фундаментов в соответствии с ранее разработанными техническими решениями.

Следует особо обратить внимание на то, что технические решения оснований и фундаментов разрабатываются с учетом прогноза изменения ИГМ условий под влиянием строительства и эксплуатации проектируемых зданий и сооружений. Поэтому прогноз изменения ИГМ условий должен предшествовать разработке технических решений, т. е. выполняться при изысканиях для технического проекта.

При изысканиях для рабочих чертежей, когда определяются уже не обобщенные, а конкретные ИГМ условия на участках размещения зданий и сооружений, для каждого из них производится

уточняющее прогнозирование ИГМ условий, на основе которого выполняется расчет оснований и фундаментов.

При строительстве отдельных зданий как проектирование, так и изыскания в некоторых случаях выполняются в одну стадию. Совмещенные изыскания можно проводить без ущерба для качества проектирования и строительства лишь в том случае, когда заранее известно техническое решение оснований и фундаментов, т. е. на основе учета опыта безаварийной эксплуатации аналогичных по воздействию на грунты зданий и сооружений в подобных ИГМ условиях. Размеры участков, на которых ведутся изыскания, в этом случае должны значительно превышать размеры отдельного здания.

Во всех остальных случаях изыскания производятся в 2 этапа — для технического проекта и для рабочих чертежей. Предварительный этап изысканий выполняется для генплана (ПП или ПДП) населенных мест, а также при необходимости — для ТЭО промышленного строительства.

§ 4. СВОЙСТВА ГРУНТОВ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ПРИ ИЗЫСКАНИЯХ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Свойства грунтов нужно знать при прогнозировании температурного режима грунтов оснований и расчете оснований и фундаментов по прочности, деформациям и устойчивости в условиях прогнозного температурного режима. В связи с тем что на различных этапах инженерно-геологических изысканий решаются разные задачи, на каждом из этих этапов определяется та или иная совокупность свойств грунтов.

При изысканиях для ТЭО свойства грунтов обследуемых территорий, как правило, не определяются, так как инженерно-геологическая оценка в данном случае делается в основном качественными методами.

На каждом из этапов изысканий для технического проекта, подразделяющихся на изыскания для выбора площадки и на выбранной площадке, решается свой круг задач и определяются различные комплексы свойств грунтов. В первом случае сопоставляют свойства грунтов и выбирают площадку (трассу) с наиболее благоприятными для строительства ИГМ условиями. Оценку и сопоставление площадок ведут по степени засоленности грунтов и по содержанию в них ледяных включений, а также по суммарной влажности грунтов (ледяные включения плюс ледцемент и незамерзшая вода) и степени их дисперсности, позволяющей судить о способности грунтов к пучению. Следует отметить, что площадки сопоставляются не только по свойствам грунтов.

При изысканиях для разработки генерального плана жилищного и гражданского строительства свойства грунтов определяются так же, как и при выборе площадки для промышленного

и сельскохозяйственного строительства. При изысканиях для технического проекта и рабочих чертежей перечень свойств грунтов для всех этих видов строительства совпадает.

Номенклатура свойств грунтов выбранной площадки или трассы, определяемых при изысканиях, должна обеспечить:

а) районирование площадки (трассы) и размещение на ней зданий и сооружений (определение положения оси линейного сооружения);

б) прогнозирование температурного режима грунтов и прочих ИГМ условий площадки (трассы);

в) разработку технических решений оснований и фундаментов, т. е. выбор принципа использования вечномерзлых грунтов в качестве оснований, типов фундаментов и их средних параметров, конструктивных особенностей цокольной части, эксплуатационных мероприятий и т. п.

Для целей прогнозирования температурного режима грунтов должны быть определены теплофизические и физические свойства грунтов. Некоторые физические свойства, например суммарная влажность, количество ледяных включений, объемный вес, используются и при районировании.

При изысканиях на выбранной площадке еще не известны технические решения оснований и фундаментов, разработка которых требует знания прочностных и деформационных свойств грунтов. Изыскания должны дать материалы для расчета различных вариантов использования вечномерзлых грунтов в качестве оснований (в мерзлом, оттаивающем или оттаявшем состоянии), с различным температурно-прочностным состоянием вечномерзлых грунтов (твердомерзлые или пластичномерзлые), с различными типами фундаментов и по разным предельным состояниям, из которых затем выбирается оптимальный вариант.

Но определить в обычные для изысканий сроки полный перечень механических характеристик грунтов, а также провести опытные полевые работы, по которым могут быть рассчитаны все варианты совместной работы оснований и фундаментов, по существу, невозможно, да и нецелесообразно, поскольку (и это главное) при изысканиях для технического проекта, как правило, неизвестны конкретные участки размещения тех или иных зданий и сооружений, а единичное определение механических характеристик грунтов для случайных точек на площадке (трассе) лишено смысла. Поэтому прочностные и деформационные характеристики грунтов в данном случае определяются по табличным данным и рассчитываются по физическим характеристикам.

При изысканиях для рабочих чертежей свойства грунтов определяются на конкретных участках размещения тех или иных зданий и сооружений с учетом принятых технических решений оснований и фундаментов. Это обстоятельство существенно ограничивает перечень необходимых для проектирования механических характеристик грунтов и обеспечивает возможность их

непосредственного определения. Исходя из технических решений оснований и фундаментов тех или иных проектируемых объектов, а также ИГМ условий конкретных участков их размещения, определение механических свойств грунтов дифференцируется в зависимости от следующих факторов:

а) принципа использования вечномерзлых грунтов в качестве оснований;

б) температурно-прочностного состояния грунтов при эксплуатации зданий и сооружений (по прогнозу);

в) направления действия на грунты основных сочетаний нагрузок и характера планировки прилегающих к проектируемым зданиям или сооружениям участков.

Дифференциация эта достаточно проста и выполняется по следующей схеме.

Если грунты оснований будут использоваться в оттаивающем в процессе эксплуатации состоянии, то определяют только сцепление и угол внутреннего трения на отталкивающих монолитах — для расчета по несущей способности оснований и фундаментов, а также сжимаемость грунта при оттаивании под нагрузкой для расчета по деформациям.

При использовании грунтов в оттаявшем состоянии определяют те же механические характеристики, но вместо величины относительного сжатия при оттаивании под нагрузкой находят сжимаемость оттаявшего грунта.

Если грунты используются в вечномерзлом состоянии, то при эксплуатации они могут находиться в твердомерзлом или пластичномерзлом состояниях. В первом случае основания и фундаменты рассчитываются только по прочности, для чего используются значения нормативных сопротивлений мерзлого грунта нормальному давлению и сдвигу, определяемые обычно по СНиП II-Б.6—66. Во втором случае должны быть определены только величины сцепления и относительного уплотнения пластичномерзлого грунта под нагрузкой, так как основания, сложенные пластичномерзлыми грунтами, рассчитываются только по деформациям, а предельное значение нагрузок устанавливается с использованием табличных данных из СНиП II-Б.6—66 и величины сцепления.

Если при этом нагрузки, действующие на грунт, в основном сочетании будут горизонтальными или основания будут ограничены откосами, идущими вниз, то требуется дополнительно определить угол внутреннего трения для расчета фундаментов по устойчивости.

У некоторых видов зданий и сооружений нагрузки, передаваемые на сжимаемые грунты оснований, могут быть незначительными. В этих случаях, если величины осадок, определенные по физическим характеристикам (или табличным данным), существенно меньше их допустимых значений, можно вообще отказаться от непосредственного определения механических свойств

грунтов. Возможны и другие случаи, когда более трудоемкие определения могут быть заменены менее трудоемкими, однако это не должно идти в ущерб качеству проектных работ.

Физические и теплофизические свойства грунтов при изысканиях для рабочих чертежей определяются во всех случаях по стандартному перечню, исключая случаи, специально оговоренные в техническом задании на изыскания.

§ 5. ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ ТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАНИЙ НА ИЗЫСКАНИЯ

Для правильного планирования и выполнения изысканий необходимо четко представлять характер взаимодействия зданий и сооружений с грунтами оснований, а для этого необходимо знать характеристики проектируемых объектов. Степень детальности этих сведений зависит от стадии проектирования. Эти сведения на каждом этапе изысканий должны быть достаточными для наилучшего решения предстоящих задач. В то же время не следует допускать избыточности представляемой изыскателям информации, т. к., помимо излишних затрат труда на подготовку и рассмотрение такой информации, она может привести к путанице при составлении программы изысканий и их производстве. Технические задания должны содержать только те сведения, которые необходимы для решения задач изысканий на том или ином этапе.

При инженерно-геологических изысканиях для ТЭО задача заключается в выделении неблагоприятных и благоприятных для строительства участков. Чтобы знать, какие участки по размерам будут достаточными для строительства, необходимо иметь схему генерального плана площадки, представляющую собой наиболее экономную компоновку проектируемых объектов, произведенную с учетом технологических или иных особенностей их взаимного расположения. Для того, чтобы определить степень пригодности того или иного участка для различных групп объектов по ИГМ условиям, определяемым предварительно, необходимо знать тепловыделение проектируемых зданий и сооружений и величину их нагрузок на грунты. Наконец, для поисков благоприятных и выделения неблагоприятных участков необходим картографический материал:

При выборе площадки (трассы) на стадии технического проекта изыскателям необходимы те же сведения, но картографический материал должен быть более крупного масштаба, чем в первом случае, т. к. он должен позволять нанесение ИГМ условий площадок. Кроме того, должны быть известны ограничения по расширению площадок в связи с наличием генерального плана других видов застройки, правилами техники безопасности, санитарными нормами и т. д.

При изысканиях для генерального плана жилищного и гражданского строительства содержание технических заданий должно

быть аналогично изложенному. На остальных стадиях проектирования содержание заданий совпадает для всех видов строительства.

Чтобы проводить изыскания на выбранной площадке (трассе) для разработки технического проекта строительства, необходимы уже более подробные сведения о зданиях и сооружениях. В процессе этих изысканий определяются ИГМ условия площадки (трассы); по этим условиям площадка (трасса) районизируется; разрабатываются рекомендации по размещению тех или иных зданий и сооружений в пределах выделенных при районировании участков и прогнозируются ИГМ условия при эксплуатации проектируемых объектов на этих участках; разрабатываются рекомендации по техническим решениям оснований и фундаментов.

Для этого необходимо знать:

а) особые требования, предъявляемые к грунтам оснований теми или иными зданиями или сооружениями; особенности взаимного размещения зданий и сооружений; соображения по предпочтительному типу фундаментов; иметь схему внутривысотных коммуникаций (районирование и разработка рекомендаций по размещению на площадке зданий и сооружений);

б) предварительные сведения о конструкции и характеристиках охлаждающих устройств для сохранения вечномерзлого состояния грунтов оснований по каждому типу проектируемых зданий и сооружений; характеристику материала фундаментов; предполагаемые условия прокладки и ввода в здания инженерных коммуникаций; характеристику их температурного режима; физические и теплофизические свойства материала их конструкций; предполагаемые конструктивные характеристики дорог, насыпей и других сооружений такого типа (прогнозирование температурного режима вечномерзлых грунтов оснований, разработка рекомендаций по техническим решениям оснований и фундаментов).

Технические задания на изыскания для рабочих чертежей должны обеспечивать на участках конкретных зданий и сооружений определение ИГМ условий, необходимых для уточняющего прогнозирования температурного режима и изменения свойств вечномерзлых грунтов в условиях эксплуатации проектируемых объектов (расчет оснований и фундаментов и определение самих этих свойств). Поэтому должны быть известны участки размещения зданий и сооружений в пределах площадки (трассы); т. е. генеральный план.

Для определения расчетного (прогнозируемого) температурного режима грунтов оснований нужно знать технический проект в той его части, которая касается устройства оснований, фундаментов и цокольной части здания, всех инженерных коммуникаций, кроме воздушных, а также благоустройства площадок.

Если помимо стандартных видов изыскательских работ возникает необходимость выполнения специальных исследований или наблюдений, то это также должно быть указано в техническом задании, и необходимость таких работ должна быть обоснована.

При изысканиях для рабочих чертежей во многих случаях устанавливают деформационные характеристики мерзлых или оттаивающих грунтов. Для определения предельных нагрузок при компрессионных испытаниях грунтов с учетом глубины отбора монолитов или установки штампа в техническом задании должна быть приведена эпюра напряжений в грунтах оснований по каждому конкретному зданию и сооружению, размещаемому на площадке (трассе).

В зависимости от задач изысканий, которые по тем или иным причинам могут быть более узкими, чем в общем случае, или измененными, содержание технических заданий следует корректировать.

СОСТАВ И СОДЕРЖАНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ ДЛЯ ТЭО, ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТА И РАБОЧИХ ЧЕРТЕЖЕЙ

§ 1. ПРИНЦИПЫ ПРОИЗВОДСТВА ИЗЫСКАНИЙ

В зависимости от задач инженерно-геологических изысканий для различных стадий проектирования в каждом конкретном случае изменяется подход к методике изысканий и используются различные принципы производства изыскательских работ.

Значительные размеры территорий, на которых проводятся изыскания для ТЭО, ограниченность времени и средств на эти работы не позволяют использовать традиционные методы сплошного изучения инженерно-геологических условий. Анализ задач изысканий показывает, что при исследовании необходимого для их решения комплекса ИГМ условий вполне допустимо использование способов ускоренной оценки этих условий ландшафтными методами [6, 7, 29].

С. В. Викторов [6] ландшафтом называет природный комплекс, образованный закономерным сочетанием климатических, литологических, гидрогеологических, геоморфологических, почвенно-геоботанических и других физико-геологических условий. Ведущими компонентами ландшафта, которые определяют его размещение, будут климат, литология, гидрогеология и тектоника. Рельеф и почвенно-растительный покров зависят от ведущих компонентов и обуславливают внешний облик ландшафта, являясь его физиономическими компонентами. В зависимости от сочетания физиономических компонентов каждый ландшафт приобретает черты своеобразного обобщенного типа местности [35].

Существуют и другие внешние компоненты ландшафта (физико-геологические явления, гидрографическая сеть и т. д.), которые, однако, не имеют такого физиономического значения, как рельеф и растительность. Рельеф здесь понимается более широко, чем это обычно принято в геологии, — он включает и геоморфологические элементы. (В чисто практических целях геоморфологические элементы и рельеф не следует отождествлять. Геоморфологические элементы удобнее считать не только внешними, но и ведущими компонентами ландшафта, а рельеф следует рассматривать как чисто внешний компонент, проявляющийся в пределах геоморфологического элемента).

Таким образом, каждому определенному комплексу геологических условий вообще и ИГМ условий в частности соответствует определенный комплекс физиономических компонентов ландшафта, т.е. определенное сочетание рельефа и растительного покрова. В условиях однородного рельефа физиономическим компонентом ландшафта будет растительный покров.*

На любой территории можно выделить ряд различных ландшафтов и каждому выделенному по рельефу и растительности типу будет соответствовать определенный тип ИГМ условий. Можно полагать также, что повторяющиеся ландшафты характеризуются практически одинаковыми ИГМ условиями. Поэтому первоначальную инженерно-геологическую оценку территории можно выполнить, проведя ландшафтное районирование этой территории и установив число различных типов ИГМ условий на ней. При этом определенному количеству различных ландшафтных типов, выделенных при районировании, будет соответствовать то же число различных типов ИГМ условий. Одинаковым ландшафтными типам будут соответствовать одинаковые ИГМ условия. Знание такой зависимости позволяет резко сократить объем работ по определению ИГМ условий любой территории: число участков, на которых определяются ИГМ условия, будет равно числу различных ландшафтных типов на территории изысканий, а объем работ сократится во столько раз, во сколько число всех участков, выделенных при ландшафтном районировании, больше числа различных ландшафтных типов.

Если же однородные ландшафтные типы развиты на обширных участках, то достаточно определить ИГМ условия на какой-либо площадке в пределах этого участка и считать, что эти условия характерны для участка в целом. Такие площадки принято называть ключевыми участками (или ключами). Целесообразно также ввести название ключевого ландшафта для одного из серии однородных участков.

Возможности ландшафтного метода этим не исчерпываются. Можно установить, для каких конкретных комплексов ИГМ условий те или иные внешние компоненты ландшафта являются характерными, т.е. установить конкретные связи между типами ландшафтов и типами ИГМ условий. Здесь внешние компоненты ландшафта будут являться индикаторами тех или иных ведущих его компонентов. Если такие связи установлены, то путем ландшафтного районирования, а затем дешифрирования внешних компонентов ландшафта можно, в принципе, характеризовать ИГМ условия территории и без непосредственного их определения. Надо, однако, заметить, что в различных природно-климатических зонах характер зависимостей между физиономическими и ведущими компонентами ландшафта меняется, и в каждом но-

* Для простоты дальнейшего изложения под ландшафтом будет пониматься сочетание его физиономических компонентов.

вом районе работ их надо определять заново. Кроме того, ускоренные методы надежны лишь при работе с естественными ландшафтами.

Ускоренные методы являются основными при изысканиях для ТЭО. В сочетании с другими методами они используются также и при изысканиях для технического проекта. Особенно широко в этом случае они применяются при изысканиях внеплощадочных линейных сооружений.

При изысканиях для технического проекта, как известно, выбирается площадка или трасса строительства и производятся работы на выбранной площадке (трассе).

Изыскания для выбора площадки (трассы) и изыскания на выбранной площадке (трассе), несмотря на различия в задачах и в комплексе определяемых ИГМ условий, близки между собой по основному принципу, положенному в их основу, — типизации ИГМ условий. И в том и в другом случае главным методом оценки территории является ее районирование. Но критерии типизации (районирования) каждый раз будут разными. Это объясняется тем, что при выборе площадки (трассы) и на выбранной площадке (трассе) отличаются задачи изысканий, и поэтому в каждом случае различен комплекс определяемых для решения этих задач ИГМ условий, которые служат критериями типизации территории исследований.

Разница в этих критериях типизации существует также при выборе площадки и при выборе трассы линейного сооружения. Здесь, несмотря на тождество задач изысканий, причина различий определяемых ИГМ условий заключается в следующем: при выборе площадки, производимом в небольшом районе, ИГМ условия являются в основном определяющими для выбора того или иного участка, т. к. прочие факторы, влияющие на экономику строительства на этих участках, обычно примерно одинаковы. Для линейных сооружений, особенно магистральных, стоимость строительства и эксплуатации определяется их протяженностью. Поэтому главным условием при выборе трассы является ее наименьшая протяженность, т. е. в идеальном случае трасса должна быть прямой. Отклонения от прямой допускаются, в частности, там, где прямая прокладка опасна для устойчивости и целостности сооружения, т. е. на участках, характеризующихся опасными для строительства ИГМ условиями. Поэтому при выборе площадки ИГМ условия становятся основными, а при выборе трассы их роль сводится к оценке тех или иных участков территории по технической возможности строительства на них.

Из этого вытекает разница в номенклатуре определяемых ИГМ условий и в детальности их определения. В частности, если при выборе трассы магистральных линейных сооружений обычно достаточен масштаб отчетных картографических материалов 1 : 100 000, то при выборе площадки масштаб должен быть не мельче 1 : 25 000 (1 : 5000—1 : 25 000).

Несмотря на указанную разницу, основой изысканий остается ландшафтное районирование территории. ИГМ условия определяются не на каждом выделенном ландшафте, а только на ключевых ландшафтах и в пределах ключевых ландшафтов — на ключевых участках. Полученные на ключах материалы экстраполируются на ключевые ландшафты в целом и далее — на все однородные с ключевыми ландшафтными участки. По существу, в данном случае получается не инженерно-геологическое районирование территории, а ландшафтное.

При изысканиях на выбранной площадке, в противоположность этому, ландшафт не является ведущим признаком при районировании, а играет вспомогательную роль. На выбранной площадке ИГМ условия определяются по регулярной сетке, покрывающей всю территорию площадки, что дает возможность выполнять инженерно-геологическое районирование, при котором ландшафт служит для уточнения границ между разными инженерно-геологическими участками.

Изыскания на выбранной трассе в этом смысле занимают промежуточное положение. Ландшафтное районирование служит основой для выделения инженерно-геологических районов, в пределах каждого из которых определяются ИГМ условия на ключевых участках. Границы между ландшафтами по-прежнему определяют границы инженерно-геологических районов, но тождественность ландшафтов на разных участках уже не является основанием для экстраполяции однажды определенных ИГМ условий и понятие ключевых ландшафтов применяется лишь в достаточно редких случаях.

При изысканиях для рабочих чертежей исследуются ИГМ условия на участках расположения конкретных зданий и сооружений — как правило, в пределах их габаритов. Эти изыскания должны обеспечить исходными материалами расчеты оснований и фундаментов по предельным состояниям. При этом ИГМ условия определяются не только при естественных температурах, но и при прогнозном температурном режиме. В отличие от изысканий для технического проекта, температурный режим прогнозируется в соответствии с техническим проектом оснований и фундаментов на конкретных участках размещения проектируемых объектов с целью определения значений прочностных и деформационных свойств грунтов при их прогнозных температурах.

Инженерно-геологическое опробование при изысканиях для рабочих чертежей производится в пределах активных зон зданий и сооружений. При опробовании применяются, как правило, методы прямого определения ИГМ условий, в том числе и свойств грунтов. Методы же, которые дают опосредствованную оценку ИГМ условий, обычно не используются. Исключение в этом смысле составляют изыскания для линейных сооружений, по оси которых проходят электропрофили (ЭП) и ставятся точки вертикального электрического зондирования (ВЭЗ).

В отличие от изысканий для технического проекта, где состав и содержание изысканий (по видам строительства) стандартны, состав и содержание инженерно-геологических работ для составления рабочих чертежей дифференцируются в зависимости от технических решений оснований и фундаментов, принятых в техническом проекте зданий и сооружений:

а) принятого принципа использования вечномерзлых грунтов в качестве оснований;

б) температурно-прочностного состояния грунтов оснований при эксплуатации зданий и сооружений (по прогнозу);

в) направления воздействия нагрузок на грунты (в основном сочетании) от зданий и сооружений, а также характера планировки примыкающих к зданиям участков;

г) типов проектируемых фундаментов.

Необходимость дифференцированного подхода к изысканиям с учетом указанных факторов обуславливается тем, что в зависимости от них при проектировании каждый раз решается определенный круг задач, требующий знания тех или иных ИГМ условий и, в частности, свойств грунтов, но отнюдь не полного их комплекса. Такой подход позволяет удешевить изыскания и уменьшить время их выполнения не в ущерб качеству получаемых материалов. В связи с этим можно отметить, что инженерно-геологические работы при изысканиях должны быть более целенаправленными по сравнению с инженерно-геологическими съемочными работами, предполагающими всестороннее комплексное изучение какой-либо территории [15, 21]. В нормативных документах эти обстоятельства отражены недостаточно ясно (СНиП II-A.13—69).

С другой стороны, очевидно, что предшествующие изысканиям среднемасштабные съемочные инженерно-геологические (мерзлотные) работы могли бы существенно улучшить качество и экономику изысканий, а общие суммарные затраты на съемку и изыскания вряд ли превысили бы существующие совокупные расходы на изыскания в различных ведомствах. Поэтому практика подсказывает, что было бы целесообразно ввести систему государственных инженерно-геологических (мерзлотных) съемок масштаба 1 : 500 000—1 : 200 000.

§ 2. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ МЕРЗЛОТНЫЕ УСЛОВИЯ, ИЗУЧАЕМЫЕ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ИЗЫСКАНИЙ

При изысканиях для ТЭО необходимо прежде всего определить, какими ИГМ условиями будут характеризоваться участки, опасные для строительства, заведомо благоприятные, а также участки, перспективные для выбора площадок строительства. К опасным для строительства относятся:

а) участки развития мерзлотных физико-геологических процессов и явлений;

б) участки распространения грунтовых вод на глубинах, соответствующих возможным глубинам оттаивания грунтов оснований проектируемых зданий и сооружений;

в) участки тектонических нарушений;

г) участки вероятного развития наледей;

д) склоны и участки, прилегающие к ним;

е) участки распространения торфяников.

Размещение зданий и сооружений на участках распространения мерзлотных физико-геологических процессов и явлений, на склонах и прилегающих к их бровке и подножью участках, а также на торфяниках, часто льдонасыщенных и подстилаемых подземными льдами, может привести к нарушению устойчивости и прочности оснований и фундаментов, что, по-видимому, не требует специальных пояснений. На участках, где развиты грунтовые воды, а также на участках тектонических нарушений, часто также связанных с деятельностью подземных вод, при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений возможно образование разрушительных грунтовых наледей. Грунты в пределах участков тектонических нарушений могут характеризоваться, кроме того, повышенной льдистостью. Участки вероятного развития наледей, а также морозобойного растрескивания грунтов представляют опасность для элементов конструкций зданий и сооружений.

К участкам, ИГМ условия которых являются заведомо благоприятными для строительства, относятся:

а) участки распространения скальных, полускальных, крупнообломочных и гравийно-галечниковых грунтов;

б) участки распространения талых грунтов;

в) участки распространения маломощных (порядка метров) вечномерзлых грунтов.

Талые грунты, даже если они слабые и водонасыщенные, для большинства видов строительства следует признать более благоприятными по сравнению с мерзлыми грунтами, поскольку учет изменения их механических свойств в результате строительства и эксплуатации зданий и сооружений более прост и надежен. Скальные и полускальные грунты большей частью не меняют своих свойств при строительстве. Практически невелика сжимаемость крупнообломочных и гравийно-галечниковых грунтов, исключая случаи, когда эти грунты являются сильнольдистыми.

Маломощные вечномерзлые грунты часто позволяют использовать в качестве оснований подстилающие их талые грунты. Кроме того, осадки при оттаивании этих грунтов при прочих равных условиях меньше, а предпостроечное оттаивание их — выгоднее и эффективней.

Территория, которая перспективна для выбора площадок строительства, будет состоять из участков заведомо благоприятных, а также не опасных для строительства.

Чтобы дать общую инженерно-геологическую оценку территории изысканий и выделить в ее пределах все указанные участки, необходимо знать следующие ИГМ условия этой территории: геологическое строение; геоморфологию; литологические особенности грунтов, по-возможности — их генезис и возраст; распространение по площади вечномерзлых и талых грунтов; ориентировочную мощность вечномерзлых грунтов; глубины сезонного оттаивания и промерзания; характеристику грунтовых вод; гидрографию; мерзлотные физико-геологические процессы и явления и участки их распространения.

Детальность выявления этих ИГМ условий зависит от наличия картографических или аэрофотоматериалов территории изысканий и должна обеспечить выполнение поставленных задач. Обычно используются топографическая основа масштаба не мельче 1 : 100 000 и плановые аэрофотоматериалы масштаба не мельче 1 : 60 000. На этом этапе изысканий использование картографических материалов масштаба крупнее 1 : 50 000 вряд ли оправданно.

При выборе площадки (трассы) в заданном районе, если изыскания для ТЭО строительства не проводились, прежде всего выделяются участки, ИГМ условия которых опасны для строительства. Эти участки и условия, их характеризующие, перечислены выше.

Сопоставление вариантов площадок производится уже по другим составляющим ИГМ условий. В первую очередь, должно быть установлено распространение по площади вечномерзлых и талых грунтов, т. к. в большинстве случаев талые грунты более благоприятны для строительства. Затем принимаются во внимание литологические особенности грунтов и их суммарная влажность. Литологические особенности, как известно, в значительной степени определяют свойства мерзлых грунтов. Суммарная влажность (с учетом ледяных включений) является показателем их льдистости, а тем самым — прочности и деформативности. По мере увеличения количества ледяных включений, при прочих равных условиях, снижается прочность вечномерзлых грунтов. Наряду с этим количество ледяных включений позволяет оценить величину возможной осадки грунтов при их оттаивании, а в сопоставлении с суммарной влажностью — общий характер деформации грунтов. Важной характеристикой грунтов является их засоленность.

Важнейший показатель состояния грунтов — их среднегодовая температура. Несмотря на то что температурный режим грунтов при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений будет изменяться, среднегодовая температура грунтов в естественных условиях имеет очень большое значение для сопоставления тех или иных участков территории. Чем ниже будет отрицательная температура грунтов, тем более благоприятными следует считать их свойства.

Площадки сопоставляются также по глубинам сезонного оттаивания или промерзания грунтов. Меньшие глубины оттаивания (промерзания) характеризуют более благоприятные для строительства ИГМ условия. Грунты площадок должны сопоставляться и по их дисперсности, т.к. последняя определяет, в частности, возможность пучения грунтов. Кроме того, определяются объемный вес и криогенная текстура грунтов.

Сопоставление вариантов трасс линейных сооружений и выбор наилучшего варианта, исключая внутривысоточные сооружения, производится на основе иного комплекса ИГМ условий, как правило, не связанного с использованием материалов горнопроходческих работ. В этих случаях для сопоставления применяются те же ИГМ условия (и способы их определения), что и для оценки территории при изысканиях для ТЭО.

Выбор трасс внутривысоточных линейных сооружений и определение ИГМ условий на выбранной трассе ведутся по материалам изысканий на выбранной площадке.

Для технического проекта изыскания на выбранной площадке (трассе линейных сооружений, кроме внутривысоточных) характеризуются изучением практически полного комплекса инженерно-геологических мерзлотных условий, исключая непосредственные определения механических свойств грунтов (лабораторным путем или с помощью опытных полевых работ). Это обусловлено, как отмечалось, в основном, отсутствием на этом этапе изысканий привязки зданий и сооружений и технических решений оснований и фундаментов, от которых и зависит номенклатура используемых при проектировании механических свойств грунтов. Поэтому на выбранных площадках определяется следующий комплекс ИГМ условий: распространение по площади вечномерзлых и талых грунтов; литологические особенности грунтов, их возраст и генетическая характеристика; мощность вечномерзлых грунтов и вертикальное строение вечномерзлой толщи; криогенная текстура грунтов и количество ледяных включений; температурный режим грунтов; физические и теплофизические свойства грунтов; климатическая характеристика района работ; прогноз изменения температурного режима грунтов оснований и других ИГМ условий при строительстве и эксплуатации проектируемых зданий и сооружений.

К числу определяемых физических характеристик грунтов относятся: суммарная влажность грунтов; количество льда-цемента и незамерзшей воды в интервале температур, принимаемых грунтом; удельный вес; объемный вес грунтов; пределы пластичности; гранулометрический состав; максимальная молекулярная влагоемкость грунтов.

Из теплофизических свойств грунтов, которые в естественных условиях находятся в вечномерзлом состоянии, определяются их удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности грунтов (в талом и мерзлом состоянии) при естественной влажности и

плотности. Все эти свойства определяются экспериментально. Дополнительно некоторые свойства грунтов определяются расчетным путем. К ним относятся: степень заполнения пор мерзлого грунта льдом и незамерзшей водой; объемный вес скелета мерзлого грунта; пористость и коэффициент пористости мерзлого грунта; объемная теплоемкость грунта в мерзлом и талом состоянии; объемная льдистость за счет ледяных включений; количество скрытой теплоты плавления льда (замерзания воды); величина относительного сжатия предварительно оттаявших вечномерзлых грунтов; величина относительного сжатия вечномерзлых грунтов, оттаивающих в процессе эксплуатации зданий и сооружений; нормативное сопротивление мерзлых грунтов сдвигу по бетонным, деревянным и металлическим поверхностям, с которыми грунты смерзлись, при наиболее низкой (максимальной) отрицательной температуре мерзлых грунтов в течение всего времени эксплуатации проектируемых зданий и сооружений (по таблицам); нормативное сопротивление мерзлых грунтов нормальному давлению при их максимальной температуре в течение всего времени эксплуатации проектируемых зданий и сооружений (по таблицам).

Если же грунты в естественных условиях являются талыми, то для них определяют (экспериментально, расчетом или по таблицам) те же свойства, что и при изысканиях в обычных условиях и дополнительно — объемную теплоемкость, а также коэффициент теплопроводности грунта в талом и мерзлом состоянии при их естественной влажности и плотности. Для грунтов, залегающих в пределах нормативной глубины слоя сезонного оттаивания (промерзания), определяют те же свойства грунтов, что и для вечномерзлых.

Климатическая характеристика района работ должна содержать среднедекадные температуры воздуха по средним многолетним данным, среднедекадные значения мощности и плотности снежного покрова, а также средние даты его установления и схода (по средним многолетним данным), радиационный баланс поверхности и величину коэффициента теплоотдачи с поверхности грунтов, если этот коэффициент определяется для района работ. Климатическая характеристика района дается по официальным справочным материалам Гидрометеослужбы для ближайшей к району работ метеостанции. По этим же данным определяется годовой ход температуры грунтов (по средним многолетним данным) на площадке метеостанции по всем глубинам наблюдений.

При изысканиях для генплана жилищного и гражданского строительства определяются те же ИГМ условия, что и для выбора площадки промышленного и сельскохозяйственного строительства, а для техпроекта жилищного и гражданского строительства — те же условия, что и на выбранной площадке.

При изысканиях для рабочих чертежей также определяются геологическое строение и литологические особенности грунтов участка строительства, но в данном случае участка, предназначенного для строительства того или иного конкретного здания или сооружения. Для линейных сооружений геологическое строение и состав грунтов определяются по оси сооружения, местоположение которой устанавливается техническим проектом в пределах полосы выбранной трассы. Кроме того, на участке каждого проектируемого объекта определяется точное положение границ между вечномерзлыми и талыми грунтами.

По трассам магистральных линейных сооружений выделяют различные ландшафты в полосе шириной порядка 500 м, осью которой является ось сооружения.

На каждом участке определяются также нормативные глубины сезонного оттаивания грунтов, без знания которых невозможен расчет оснований и фундаментов.

Физические, теплофизические и механические характеристики грунтов определяются для расчета оснований и фундаментов по прочности и устойчивости. В их числе определяют и рассчитывают суммарную влажность; льдистость за счет ледяных включений; объемный вес; удельный вес; гранулометрический состав; пластичность (для связных грунтов); относительную льдистость; коэффициент теплопроводности; удельную теплоемкость; объемную теплоемкость; количество скрытых теплот; пористость и коэффициент пористости; степень заполнения объема пор мерзлого грунта льдом и незамерзшей водой; объемный вес грунтов в воздушно-сухом состоянии при максимальном уплотнении.

Для грунтов, которые встречены при изысканиях в талом состоянии, кроме грунтов слоя сезонного оттаивания и промерзания, определяют те же свойства, что и в обычных условиях и дополнительно коэффициент теплопроводности и объемную теплоемкость. Номенклатура механических свойств грунтов, определяемых при изысканиях для рабочих чертежей, видоизменяется в зависимости от целого ряда факторов и приведена ниже.

Каждый участок (или трасса) характеризуются температурным режимом грунтов в естественном состоянии и прогнозным температурным режимом в условиях строительства и эксплуатации проектируемых зданий и сооружений. Для прогнозирования необходима климатическая характеристика района строительства, которая по составу и объему та же, что и при изысканиях для технического проекта.

§ 3. СОСТАВ И СОДЕРЖАНИЕ ИЗЫСКАНИЙ

Для ТЭО строительства

Изыскания для ТЭО строительства заключаются в мерзлотном обследовании территории. Различаются предварительное (предполевое) и полевое мерзлотное обследование,

Начинается мерзлотное обследование с предварительного ландшафтного районирования территории, дешифрирования физиономических компонентов ландшафта и определения ИГМ условий на выделенных ландшафтных типах; если известны внешние индикаторы тех или иных составляющих этих условий. Эти работы выполняются перед выездом в поле и их результаты являются предварительными. Они подлежат уточнению и дополнению в процессе полевых работ, выполняющихся в свою очередь на основе этих предварительных материалов.

Районирование и дешифрирование выполняется на плановых аэрофотоматериалах масштаба не мельче 1 : 60 000, а выявленные геологические и гидрогеологические условия наносятся на топографическую основу масштаба не мельче 1 : 100 000, после чего совмещают ландшафтные типы с геологической и гидрогеологической основой, обычно на топографической карте. Совмещение дает возможность установить зависимости между внешними компонентами ландшафта и некоторыми составляющими ИГМ условий.

После районирования выполняется дешифрирование местных предметов на выделенных участках. Обычно в предполетный период удается отдешифрировать не все местные предметы, т. к. не всегда известны дешифровочные признаки. Но, например, мерзлотные физико-геологические процессы и явления устанавливаются на фотоснимках почти безошибочно (кроме подземных льдов), т. к. они имеют своеобразную форму и структуру. Однако неполное дешифрирование в процессе предполетных работ не имеет особого значения, поскольку главной задачей предварительной работы с аэрофотоматериалами является ландшафтное районирование. Следует отметить, что ландшафтное районирование и дешифрирование требуют определенного навыка. Надежность их зависит в значительной степени также от качества аэрофотоматериалов.

Результаты предварительного ландшафтного районирования гораздо более достоверны, чем результаты дешифрирования, и в совокупности с материалами геологической и гидрогеологической съемок позволяют достаточно уверенно оценить ИГМ условия различных участков территорий изысканий.

Участки, выделенные при ландшафтном районировании, переносятся на топографическую основу и характеризуются тем или иным комплексом геолого-гидрогеологических условий, нанесенных ранее на эту основу. При перенесении на топооснову материалов ландшафтного районирования неизбежно их обобщение вследствие разницы в масштабах. В свою очередь, материалы геологической и гидрогеологической съемок, нанесенные на топооснову, по этой же причине являются схематизированными. Поэтому установление связи между внешними и ведущими компонентами ландшафта надежно производится лишь для до-

статочно обширных участков, часто для целых геоморфологических элементов.

Завершается мерзлотное обследование камеральной обработкой материалов полевых работ и составлением отчета.

В итоге всей этой работы получается предварительная карта некоторых составляющих ИГМ условий масштаба 1 : 100 000. На этой карте выделены: участки с различными ландшафтами; геоморфологические элементы; участки с различным составом, возрастом и генетической характеристикой грунтов; участки распространения подземных вод и водопроявлений; глубины кровли первого от поверхности водоносного горизонта; зоны тектонических нарушений; участки распространения мерзлотных физико-геологических процессов и явлений; участки распространения вечномерзлых грунтов (если эти сведения имеются).

Эта предварительная карта является основой полевого мерзлотного обследования, задача которого состоит в уточнении и детализации материалов этой карты или, иными словами, в уточнении ландшафтного районирования, дешифрировании местных предметов и определении необходимых ИГМ условий для каждого выделенного ландшафтного подразделения.

Полевые работы ведутся с аэрофотоматериалами, а карта остается итоговым отчетным документом.

Задачи полевых работ решаются путем непосредственного обследования территории. В зависимости от ее размеров обследование может выполняться воздушным или наземным способами. В том и в другом случаях на местности устанавливаются точные границы тех или иных ландшафтов, выделенных в предварительном порядке на аэрофотоматериалах, описываются внешние компоненты ландшафта (геоморфология, рельеф, растительность всех видов, мерзлотные физико-геологические явления, гидрографическая сеть) и определяются некоторые ИГМ условия (состав грунтов, вечномерзлые они или талые, глубина сезонного оттаивания, мощность вечномерзлых грунтов). В итоге полевых работ по каждому выделенному ландшафту получают следующий комплекс ИГМ условий: геоморфология; растительность; рельеф; мерзлотные физико-геологические процессы и явления; состав грунтов; температурное состояние грунтов; мощность вечномерзлых грунтов; глубина сезонного оттаивания (промерзания) на момент исследований; наличие грунтовых вод; гидрография.

Этих материалов вполне достаточно для решения задач инженерно-геологических изысканий на данном этапе. На их основе в процессе камеральных работ составляется карта инженерно-геологического районирования территории масштаба 1 : 100 000 с пояснительной запиской к ней, содержащей характеристику ИГМ условий всех выделенных участков. Отчетные материалы должны содержать также характеристику прочих естественно-исторических условий территории изысканий, состав-

ленную преимущественно на основе анализа и обобщения материалов предшествующих исследований применительно к потребностям проектируемого строительства. С этой же целью территория кратко характеризуется состоянием экономики, путей сообщения и транспортных средств.

В отчете об изысканиях должны содержаться и рекомендации о наиболее благоприятных по ИГМ условиям участках для размещения проектируемых зданий и сооружений. При разработке этих рекомендаций из рассмотрения исключаются участки с опасными для строительства ИГМ условиями. На остальной территории выделяются участки заведомо благоприятные для строительства (перечень тех и других ИГМ условий приведен в § 2 настоящей главы). Если заведомо благоприятные участки выделить невозможно, то всю остальную территорию (кроме опасных участков) следует рассматривать как равно благоприятную для выбора площадок. Обычно, однако, находятся какие-либо дополнительные критерии, позволяющие сделать более определенный выбор в пользу тех или иных участков.

Для выбора площадки (генплана населенных мест)

Выбор площадки также начинается с мерзлотного обследования территории. Если он производится в некотором ограниченном районе, то варианты площадок выбираются при мерзлотном обследовании, аналогичном обследованию для ТЭО. В зависимости от размеров территории обследование может быть воздушным или наземным. Во всех случаях обязательно предполетная работа с аэрофотоматериалами. При изысканиях для генплана населенных мест на этом этапе выделяются опасные для строительства участки. Остальная территория рассматривается в качестве пригодной для размещения населенного пункта.

На каждом варианте площадки, выбранном в некотором районе или определенном по каким-либо соображениям проектной организацией, проводится мерзлотное обследование, состав и содержание которого отличны от состава и содержания обследования при изысканиях для ТЭО. Цель этого мерзлотного обследования — получение материалов, обеспечивающих уверенный выбор наилучшей площадки из числа обследуемых конкурирующих вариантов. При изысканиях для генплана обследуется вся территория, признанная пригодной. Мерзлотное обследование в этом случае должно обеспечить сопоставление различных участков пригодной для строительства территории и на этой основе — выделение в ее пределах различных зон населенного пункта.

Мерзлотное обследование состоит из маршрутного обследования каждого варианта площадки, буровых, геофизических, термокаротажных и лабораторных работ. Маршрутное обследование обеспечивает ландшафтное районирование территории каждой площадки, а также получение некоторой информации

об ИГМ условиях. На этой основе далее проводятся все остальные виды работ. Здесь ландшафтное районирование гораздо более детальное, чем при изысканиях для ТЭО, и выполняется на картографических материалах масштабов не мельче 1:5000. Следует отметить, что укрупнение масштаба районирования не должно быть чрезмерным, а призвано лишь обеспечивать оценку каждой площадки по ИГМ условиям и возможность размещения на ней комплекса проектируемых зданий и сооружений, т. е. масштаб выбирается в зависимости от размеров площадки и проектируемых объектов. Выбранный масштаб районирования должен также обеспечивать четкую дифференциацию инженерно-геологических районов и размещение в их пределах зданий и сооружений.

Для проведения маршрутного обследования площадка разбивается на квадраты, образующие сетку, расстояние между узлами которой обычно составляет 1 см на используемых для работы картографических материалах, т. е. не более 50 м на местности. В узлах этой сетки описываются растительность, мезо- и микрорельеф, мерзлотные физико-геологические процессы и явления, а также определяются глубины сезонного оттаивания (промерзания) грунтов и их состав (под почвенно-растительным покровом).

Материалы маршрутного обследования наносятся на топооснову масштаба не мельче 1:5000. Чаще всего топоосновы такого масштаба нет. Создавать ее для всех обследуемых площадок, из которых только одна будет использована для строительства, экономически нецелесообразно. Поэтому материалы маршрутного и других видов обследований наносятся на планы площадок, создаваемые на основе их разбивки для маршрутного обследования. Что касается высотных отметок различных точек площадок, то они в данном случае должны давать лишь представление о мезорельефе последних, и поэтому вполне допустима нивелировка площадок с помощью баронивелиров или микробарометров.

При изысканиях для генплана населенных мест материалы обследования наносят на топографическую основу соответствующего масштаба, которая должна быть предварительно создана для всей территории, пригодной для застройки. Маршрутное обследование позволяет составить карту ландшафтного районирования площадки, на основе которого можно оправданно и экономично разместить скважины.

Цель проходки скважин при мерзлотном обследовании вариантов площадки — получение информации о каждом типе ИГМ условий, индикаторами которых являются выделенные ландшафтные районы. Число скважин должно быть минимально возможным, т. е. размещать их следует на основных ландшафтных элементах, стремясь к тому, чтобы можно было более или менее равномерно охарактеризовать территорию.

Скважины используются для определения геологического строения в пределах каждого ландшафтного подразделения, отбора образцов для изучения состава, свойств грунтов, в частности их льдистости и температурного режима. Глубины скважин назначаются равными глубинам распространения годовых колебаний температуры грунтов. Это условие определяет минимальные глубины инженерно-геологических скважин, проходимых в районах распространения вечномерзлых грунтов во всех случаях, т. е. только по таким скважинам материалы термокартажных работ дают возможность получения характеристик температурного режима грунтов. В пределах территории Советского Союза глубины распространения годовых колебаний температуры изменяются от 7—8 до 20—22 м в зависимости от целого ряда факторов. В общем, можно считать, что чем ниже среднегодовые температуры грунтов и чем меньше глубины сезонного оттаивания или промерзания, тем больше глубины распространения годовых колебаний температуры. Средние значения этих глубин для различных районов Советского Союза были определены В. А. Кудрявцевым [12].

Следует заметить, что в СНиП II-Б.6—66 в качестве глубины распространения годовых колебаний температуры принята глубина, равная 10 м. Использование этой величины в общем случае может повлечь получение ошибочных значений характеристик температурного режима грунтов.

Для более полного освещения ИГМ условий площадки, помимо бурения скважин, производится вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) разреза. Поскольку выполнение этого вида работ не сопряжено со значительными затратами, каждая площадка ВЭЗами характеризуется более подробно, чем скважинами. В среднем точка ВЭЗ назначается на 2—3 га территории каждой площадки, что соответствует размещению ВЭЗ в узлах квадратной сетки со стороной порядка 150 м. ВЭЗы, как и скважины, размещаются на площадках с учетом их ландшафтного районирования так, чтобы осветить основные ландшафтные типы и, тем самым, основные типы ИГМ условий.

Вертикальное электрическое зондирование позволяет оценить геологическое строение площадок, литологические особенности грунтов и в известной мере — величину льдистости. При размещении точек ВЭЗ некоторые из них ставятся рядом со скважинами с целью получения материалов для уверенной интерпретации геоэлектрических разрезов. Глубина ВЭЗ обычно такая же, как и скважин, или чуть больше, т. е. в среднем 15—20 м. Расстояние (разносы) между питающими электродами при выполнении ВЭЗ назначается больше глубины зондирования в 3—10 раз в зависимости от конкретных местных условий.

Помимо ВЭЗ, на площадках производится электрическое профилирование, которое позволяет выделить в плане участки распространения вечномерзлых и талых грунтов, а также окон-

турить участки развития подземных льдов. Профилирование целесообразно производить по сетке маршрутного обследования, разреживая ее в той или иной степени в зависимости от степени изменчивости ландшафта.

В каждой скважине проводятся термокаротажные работы, представляющие собой измерения температуры грунтов по всему разрезу в течение достаточно короткого промежутка времени. При проходке скважин отбираются образцы для определения физико-механических свойств грунтов, а также их криогенной текстуры и оценки их объемной льдистости.

Для сопоставления площадок нет необходимости определять полный комплекс физико-механических свойств грунтов. Для этой цели достаточно характеристик дисперсности, влажности, льдистости и засоленности грунтов сравниваемых площадок. Но поскольку проходка каждой скважины обходится дорого, целесообразно полностью использовать информацию, которую можно при этом получить. Поэтому в каждой скважине, проходимой в районах распространения вечномерзлых грунтов, следует отбирать образцы для определения полного комплекса физических и теплофизических свойств грунтов. В данном случае производится отбор образцов на все виды лабораторных определений (кроме определений механических свойств) из всех скважин на каждой площадке, но исследуют свойства грунтов только по образцам с той площадки, которая будет признана наилучшей для строительства проектируемых объектов.

При выборе же площадок по каждому из обследуемых ее вариантов и по каждой скважине устанавливают: гранулометрический состав для несвязных грунтов или пластичность — для связных грунтов; засоленность; суммарную влажность; объемный вес. Ввиду того что сохранить мерзлое состояние образцов, извлекаемых из скважин, в течение достаточно длительного времени, особенно летом, сложно, рекомендуется объемный вес и суммарную влажность определять непосредственно у скважины [19].

Таким образом, по каждой из обследуемых площадок в результате проведения мерзлотного обследования выявляется определенный комплекс инженерно-геологических мерзлотных условий. Сопоставление этих ИГМ условий позволяет более обоснованно выбрать площадку, наиболее благоприятную для строительства.

При выборе площадки следует также принимать во внимание величину участков, занимаемых талыми или маломощными вечномерзлыми грунтами, поскольку такие участки более благоприятны для строительства. Кроме того, выбирая площадку, следует учитывать, что ее территория должна быть увеличена по сравнению с размерами, определенными по схеме генерального плана площадки. Это значит, что изыскания проводятся на площади, большей, чем это требуется для размещения проектируемых

объектов. Такое условие вытекает из возможности встречи на площадке участков с неблагоприятными для строительства ИГМ условиями. Опыт показывает, что максимальное увеличение площади изысканий по сравнению с номинальными размерами площадки не превышает двойного. Наибольший резерв территории требуется в тех случаях, когда имеются какие-то особые условия взаимного размещения зданий и сооружений, например технологического характера, а также тогда, когда изыскателям задается единственная площадка и ее мерзлотное обследование не проводилось.

Конфигурацию увеличенной площадки и ее размеры следует согласовать с проектной организацией, т. к. могут существовать различные ограничения в этом смысле, обусловленные, например, наличием генпланов других видов застройки, правилами горного надзора и т. п.

Результаты мерзлотного обследования по каждой площадке наносятся на топографическую основу или план масштаба не мельче 1 : 5000, а сами обследованные площадки — на топооснову масштаба не мельче 1 : 25 000. Карта с нанесенными на нее площадками используется для сравнительной оценки длины подъездных путей, внешних инженерных коммуникаций, условий водоснабжения и т. п.

Для технического проекта на выбранной площадке

На выбранной площадке изыскания проводятся более детально, чем при ее выборе. При этом объемы работ корректируются путем учета изысканий, выполненных при выборе площадки. Если же инженерно-геологические работы по выбору площадки не проводились, то на выбранной (указанной) площадке необходимо провести маршрутное обследование, а также вертикальное электрическое зондирование и электропрофилирование по тем же правилам, что и при мерзлотном обследовании.

На выбранной площадке осуществляют буровые, термомаротажные работы, лабораторные исследования грунтов, прогнозирование инженерно-геологических мерзлотных условий и камеральные работы.

При размещении скважин учитываются материалы ландшафтного районирования, но в целом соблюдается равномерность их расположения на площадке. В среднем на 2 га территории должна приходиться 1 скважина. В зависимости от местных условий и особенностей проектируемых объектов это правило, естественно, может корректироваться. К сожалению, вопросы опробования грунтов в целях типизации инженерно-геологических условий, размещения горных выработок, точек ВЭЗ и т. п. решаются до сих пор в основном на эмпирической основе, нередко не соотносимой с характером проектируемого строительства.

Глубины скважин, так же как и при мерзлотном обследовании, должны быть не менее глубин распространения годовых колебаний температуры грунтов, а часть скважин должна быть глубже и достигать подошвы чаши оттаивания, которая сможет образоваться под наиболее тепловыделяющими проектируемыми зданиями или сооружениями при эксплуатации. Эта величина определяется предварительным расчетом. Такая глубина скважин необходима для получения материалов, по которым выполняется прогнозирование температурного режима вечномерзлых грунтов основания, и для определения величин возможной осадки грунтов при их оттаивании, поскольку величина деформации основания определяется глубиной чаши оттаивания.

Число углубленных скважин зависит от предполагаемого принципа использования вечномерзлых грунтов в качестве оснований. Если в предварительном порядке наиболее вероятным считается строительство с допущением оттаивания грунтов в процессе эксплуатации или с предпостроечным оттаиванием, то число таких скважин назначается большим, чем при строительстве с предполагаемым сохранением вечномерзлого состояния грунтов оснований. Собственно, принцип использования вечномерзлых грунтов в качестве оснований и определяется на основании этих изысканий. При планировании числа углубленных скважин существенное значение имеют опыт и эрудиция изыскателей и проектировщиков (программа изысканий согласовывается с проектной организацией). Нормативные документы на изыскания [38] определяют среднее число углубленных скважин, равное $\frac{1}{4}$ от их общего числа.

Следует заметить, что эти предварительные соображения относительно принципа использования вечномерзлых грунтов площадки в качестве оснований ни в коем случае не должны предопределять рекомендаций по этому поводу по окончании изысканий.

Геофизические работы на выбранной площадке, как правило, не производятся, если данным изысканиям предшествовали геофизические работы по выбору площадки. В этом случае объемы геофизических работ, выполненные при мерзлотном обследовании вариантов, вполне достаточны для оценки ИГМ условий выбранной площадки. Скважины следует размещать так, чтобы точки ВЭЗ находились примерно между ними. В тех случаях, когда изыскания по выбору площадок не выполнялись, на выбранной площадке, как отмечалось, ставятся ВЭЗы и ЭП. При этом в пределах каждого ландшафтного района 1—2 ВЭЗа необходимо выполнять непосредственно у скважин, разрезы которых будут служить опорными для интерпретации геоэлектрических разрезов. Остальные ВЭЗы размещаются между скважинами (в среднем по сетке 150×150 м). Удобнее всего скважины и ВЭЗы размещать в шахматном порядке, определив предварительно их число соответственно размерам площадки.

При проходке скважин документацию выполняют так же, как и при обычных изысканиях, но дополнительно описывают криогенные текстуры грунта (размеры, форма и взаимное расположение ледяных включений) и подсчитывают объемную льдистость. В каждой скважине отбирают образцы для определения физических и теплофизических свойств грунтов.

Образцы для определения механических свойств грунтов на этом этапе не отбирают, поскольку еще неизвестен принцип использования вечномерзлых грунтов площадки в качестве естественных оснований, устанавливаемый в результате разработки технического проекта. Механические свойства грунтов в данном случае находят по соответствующим таблицам СНиП II-Б.1—62 и II-Б.6—66 и рассчитывают по физическим характеристикам.

В каждой скважине проводят термокаротаж грунтов, так же как и при мерзлотном обследовании. Материалы термокаротажа используют для районирования площадки и прогнозирования температурного режима грунтов.

После завершения полевых работ по их материалам осуществляют инженерно-геологическое районирование площадки. Основой районирования служат различия в составе грунтов и их среднегодовой температуре. Дополнительно учитывается суммарная влажность грунтов, которая также может служить причиной дифференциации, а иногда и их льдистость за счет включений. Все остальные данные, полученные в процессе изысканий, позволяют составить характеристики выделенных по литологии, температуре и влажности (льдистости) районов. Границы районов уточняются по ландшафтному признаку. Если районирование проведено правильно, то свойства грунтов (и другие данные) для каждого района образуют закономерные ассоциации.

Свойства грунтов по каждому району характеризуются пределами своего изменения и средними значениями. Полные и нормативные глубины сезонного оттаивания (промерзания) также характеризуются крайними и средними значениями.

Карта инженерно-геологического районирования составляется на топографической основе масштаба не мельче 1:5000. Если такой топоосновы нет, то для ее составления обязательно проводятся топографические работы на выбранной площадке.

После составления карты инженерно-геологического районирования изыскателями (иногда совместно с проектировщиками) выполняется наиболее сложный вид работ — прогнозирование изменений температурного режима вечномерзлых грунтов оснований в связи со строительством и эксплуатацией проектируемых зданий и сооружений. Прогнозирование выполняется для каждого из выделенных при районировании участков, причем в расчет принимаются средние значения характеристик грунтов по каждому такому участку. Технически прогнозирование сводится к определению температурного режима грунтов на каком-либо участке, когда на нем построено здание или сооружение, за

время, в течение которого температурный режим относительно стабилизируется. Под относительной стабилизацией понимается наступление устойчивого периодического режима.

Для прогнозирования здания и сооружения размещаются на карте в пределах площадки на тех или иных ее участках. Размещение это выполняют проектировщики на основе сопоставления ИГМ условий различных участков площадки и сравнительных характеристик зданий и сооружений.

На основе прогнозирования температурного режима выбирают принципы использования вечномерзлых грунтов в качестве оснований, определяют глубины заложения фундаментов, а также прогнозируют механические свойства грунтов в условиях строительства и эксплуатации проектируемых объектов на каждом выделенном при районировании участке площадки [14].

Температурный режим прогнозируют для каждого типа зданий и сооружений, причем целесообразнее выполнять его в двух вариантах — при обычной конструкции цокольной части зданий и сооружений и с охлаждающими устройствами. Первый вариант прогнозирования позволит судить о ходе образования чаши оттаивания и ее размерах, глубинах сезонного промерзания и оттаивания. Второй вариант дает картину температурного режима грунтов оснований с учетом влияния мероприятий, направленных на сохранение в процессе строительства и эксплуатации их вечномерзлого состояния.

В тех случаях, когда опыт местного строительства свидетельствует о невозможности сохранения вечномерзлого состояния грунтов обычными способами (без применения потребляющих энергию холодильных устройств), прогнозирование в условиях второго варианта лишено смысла.

В некоторых случаях работы по прогнозированию температурного режима грунтов вообще могут не выполняться. Это такие, правда, достаточно редкие случаи, когда имеется длительный местный опыт безаварийной эксплуатации зданий и сооружений, однотипных проектируемым, в аналогичных инженерно-геологических мерзлотных условиях.

Изыскания для технического проекта населенных мест по составу и содержанию аналогичны изысканиям на выбранной площадке.

Все указанные материалы сопровождаются комплексом различных таблиц и графиков, полный перечень которых приводится в соответствующих нормативных документах [38, 39, 40].

Для технического проекта линейных сооружений

Как отмечалось, изыскания для проектирования линейных сооружений проводятся не более чем в два этапа — для технического проекта и рабочих чертежей. На первом этапе выбирают трассу сооружения и исследуют ее ИГМ условия в той мере,

которая достаточна для разработки технического проекта сооружения. На втором этапе изыскания проводят в основном по оси сооружения, положение которой установлено техническим проектом, а определяемые при этом ИГМ условия должны обеспечить составление рабочих чертежей оснований и фундаментов проектируемого объекта.

Для составления технического проекта внутриплощадочных линейных сооружений изыскания, как правило, не проводят, т. к. обычно используют материалы изысканий для технического проекта на выбранной площадке в целом. Исключения составляют случаи, когда внутриплощадочные линейные сооружения проектируются в пределах существующей застройки, для территории которой отсутствуют материалы инженерно-геологических изысканий.

Трассы линейных сооружений выбирают на основе мерзлотного обследования территории строительства. Состав и содержание обследования при этом практически не отличаются от состава и содержания работ при изысканиях для ТЭО строительства, причем преобладающими методами полевых работ являются аэрометоды, что обусловлено значительными размерами обследуемой территории. Разница в использовании аэрометодов для ТЭО и для технического проекта линейных сооружений состоит в том, что в первом случае производится сплошное обследование всей территории возможного строительства, а во втором — обследование вариантов трасс линейных сооружений, намеченных во время предполевых работ. Предполевые работы с аэрофотоматериалами ведутся независимо от характера и размеров проектируемых линейных сооружений.

Изыскания на выбранной трассе отличаются от изысканий на выбранной площадке главным образом тем, что инженерно-геологические работы выполняются на основе карты ландшафтного районирования, составленной по материалам мерзлотного обследования вариантов трассы, на ключевых участках каждого выделенного ландшафтного района с экстраполяцией данных, полученных на ключах на всю территорию такого района.

Изыскания для магистральных сооружений на выбранной трассе, в свою очередь, несколько отличаются от изысканий сооружений незначительной протяженности. Отличается прежде всего ширина исследуемой полосы местности (ширина трассы). Для магистральных сооружений эта полоса достигает 3—4 км ширины, что обусловлено значительными размерами минимальных радиусов поворота, которые необходимо делать для обхода неблагоприятных участков. Кроме того, в этом случае появляется возможность резкого сокращения объемов изысканий для строительства последующих очередей этих сооружений. Для остальных линейных сооружений ширина полосы в несколько сот метров обычно достаточна для размещения сооружения в ее пределах с условием обхода неблагоприятных участков.

Как отмечалось, на трассах магистральных сооружений изыскания выполняются на ключевых участках, размеры которых определяются шириной трассы. Конфигурация участков близка к квадрату или кругу. Расстояние между ключевыми участками по оси трассы зависит от протяженности выделенных при районировании ландшафтных районов или участков устойчивого сочетания различных ландшафтных комплексов, что для тундровой и лесотундровой зон в среднем составляет 10—15 км (по трассе).

Ключевой участок выбирают в центральной части ландшафтного района. На каждом таком участке ведут маршрутное обследование, буровые, геофизические и термокаротажные работы. В отличие от маршрутного обследования на площадках, в данном случае обследование выполняют не сплошь по сетке, а по нескольким поперечникам, пересекающимся в центре участка и развернутым друг относительно друга. Такой прием позволяет уменьшить объем работ и в то же время достаточно полно охарактеризовать условия полосы трассы. По сравнению с работами на площадке детальность обследования и других работ здесь несколько меньше, что в основном связано со спецификой строительства. Дело в том, что площадка застраивается практически полностью. В полосе же трассы линейное сооружение займет лишь очень небольшую часть территории и поэтому при изысканиях для технического проекта нецелесообразно детально исследовать всю полосу сплошным образом. Задачей изысканий в данном случае является определение оптимального по ИГМ условиям положения оси сооружения в обследуемой полосе трассы.

Маршрутное обследование проводят по упомянутым выше поперечникам, которые могут совпадать и с осью трассы, расположенным через 50—100 м. По этим же поперечникам производится также электропрофилирование. На пересечении поперечников закладывают скважину, глубина которой определяется глубиной распространения годовых колебаний температуры в районе. Иногда проходят дополнительно еще 1—2 скважины. Возле скважин, а также на поперечниках маршрутного обследования, через 300—500 м друг от друга, осуществляют вертикальное электрическое зондирование. В скважинах выполняют термокаротажные работы.

При изысканиях трасс линейных сооружений немагистрального характера выполняют те же виды работ, однако значительно меньшие размеры обследуемой территории, увеличение доли ее, используемой для строительства, а также меньшие размеры проектируемых сооружений обуславливают необходимость более детального изучения ИГМ условий. В частности, маршрутное обследование, а также совмещаемое с ним электропрофилирование целесообразно проводить непрерывно вдоль трассы по нескольким, чаще всего трем, параллельным линиям, одна из

которых проходит по оси трассы, а описание при обследовании проводить через 50—100 м, в зависимости от степени изменчивости ландшафта.

Скважины в точки ВЭЗ в этих случаях закладываются обычно на линиях маршрутного обследования, чередуясь в шахматном порядке, но при этом у каждой опорной скважины должна быть поставлена точка ВЭЗ (для интерпретации геоэлектрических разрезов). Под опорной в данном случае понимается скважина, заложенная на наиболее характерном участке ландшафтного подразделения. Расстояния как между скважинами, так и между точками ВЭЗ принимают обычно 300 м, что позволяет довести число этих точек инженерно-геологического опробования до 6—7 на 1 *пог. км* трассы. Глубина скважин и ВЭЗ, как и во всех прочих случаях, определяется глубиной распространения годовых колебаний температуры в грунтах.

Если линейные сооружения проектируются на площадках существующей застройки, когда материалы изысканий по этим площадкам отсутствуют, проблемы выбора их трассы, как правило, не существует, поскольку ее положение определяется обычно различными техническими причинами. Когда же появляется необходимость выбора трассы из числа нескольких возможных ее вариантов, то на каждом из них проводятся изыскания такие же, как на выбранной трассе внешних линейных сооружений. Что касается трассы, выбранной в результате этих работ, то дальнейшие изыскания для технического проекта на ней не проводятся. Такое относительно детальное обследование всех вариантов вызывается тем, что на застроенных площадках воспользоваться ландшафтным методом нельзя, ИГМ условия определяются, по сути дела, вслепую.

Объем отбора образцов из скважин, а также номенклатура лабораторных работ при изысканиях для технического проекта (на выбранной площадке, трассе) стандартны. Они определяются методикой этих видов работ.

Следует еще раз заметить, что, несмотря на некоторые различия в подходе к инженерно-геологическому опробованию для различных видов строительства, обусловленные, кстати, отнюдь не методологическими причинами, изыскания для технического проекта в значительной степени стандартны.

Основными отчетными документами изысканий на выбранных трассах являются карта инженерно-геологического районирования и прогноз изменения температурного режима вечномерзлых грунтов оснований при различных способах прокладки линейных сооружений, сопровождаемые рекомендациями относительно положения оси сооружения и способа его прокладки в каждом инженерно-геологическом районе. Подробный перечень отчетных материалов приводится в соответствующих нормативных документах [38, 39, 40].

Для рабочих чертежей

При изысканиях для рабочих чертежей ИГМ условия на участках размещения конкретных зданий и сооружений определяют с помощью буровых, шурфовочных, опытных полевых, термокаротажных и лабораторных работ. При этом прогнозируется температурный режим грунтов. В ходе изысканий для линейных сооружений дополнительно проводят электропрофилирование по оси сооружений. Делается это для выявления подземных льдов на тех участках, где электропрофили, пройденные на более ранних этапах изысканий, не совпадают с положением этой оси, определенной техническим проектом линейного сооружения. Электропрофилирование в данном случае является необходимым средством страховки от размещения проектируемых объектов на участках с подземными льдами: По трассам магистральных сооружений ставятся ВЭЗы для более детальной характеристики ИГМ условий.

Дополнительно по трассам магистральных линейных сооружений в полосе шириной порядка 0,5 км проводят ландшафтное районирование. Эту работу необходимо выполнять, чтобы обеспечивать возможности корректировки положения оси сооружения, если в этом появится необходимость, например в связи с неожиданной встречей участка залегания подземных льдов.

Кроме того, по осям линейных сооружений определяют глубины сезонного оттаивания или промерзания грунтов. Обычно при работах на трассах линейных сооружений немагистрального характера эти глубины определяются при проходке скважин, закладываемых по оси сооружения для определения ИГМ условий. По осям магистральных сооружений глубины сезонного оттаивания (промерзания) определяются дополнительно в точках, отстоящих друг от друга на расстоянии 50—100 м. Как и во всех аналогичных случаях, эти глубины устанавливают большей частью путем непосредственного зондирования, например буром геолога, а иногда при помощи установок малоглубинной сейсморазведки. Указанные выше виды работ, кроме шурфовочных и опытных полевых, выполняются во всех случаях, но номенклатура определяемых свойств грунтов изменяется в зависимости от технических решений оснований и фундаментов.

Шурфовочные и опытные полевые работы выполняются лишь в строго определенных случаях.

Буровые работы нужны для установления геологического разреза и отбора образцов грунта. Скважины после бурения не ликвидируют, а используют для термокаротажа. Размещаются скважины обычно внутри контура и по контуру зданий и сооружений. Такое их размещение обусловлено тем, что нагрузки от веса зданий и сооружений (с учетом ветровых нагрузок, веса снега и т. п.) в большинстве случаев в основном сочетании направлены вертикально, и в связи с этим деформируются грунты,

находящиеся в пределах контура здания или сооружения. Поэтому при проектировании оснований и фундаментов в расчет принимаются свойства грунтов именно в этой зоне, а также прилегающих к фундаментам.

В тех случаях, когда нагрузки на грунты в основном сочетании имеют горизонтальное направление или когда основания ограничены идущими вниз откосами, деформации грунтов могут возникать и за пределами контура зданий и сооружений. Только в таких случаях возникает необходимость определения свойств подвергаемых деформации грунтов, приводящая к размещению скважин (или шурфов) за пределами контуров зданий и сооружений. Естественно, самостоятельное решение этих вопросов инженерами-геологами практически затруднено, и поэтому в техническом задании, как это отмечалось, должны быть специально оговорены вопросы о направлении нагрузок в их основном сочетании на грунты и о характере планировки прилегающих к фундаментам участков с указанием размеров активной зоны, находящейся за пределами соответствующего контура.

Количество скважин и их размещение внутри контура здания или сооружения определяется конструктивными особенностями проектируемых зданий и сооружений, в частности типом фундаментов. Например, при столбчатых фундаментах следует проходить скважины под каждый из них. Если фундаменты ленточные, то скважины следует размещать по оси этих фундаментов.

Определение расстояния между скважинами представляет собой достаточно сложную задачу, разрешаемую в настоящее время на эмпирической основе. Для ленточных фундаментов нормативные документы [38] рекомендуют среднее расстояние между скважинами 25 м. Следует заметить, что для сборных ленточных и монолитных фундаментов эти расстояния должны быть разными. При свайных фундаментах, если они располагаются равномерно, скважины тоже следует размещать равномерно. Если же сваи проектируются кустами, то скважины следует проходить под каждый куст свай. Для жестких плит плавающего типа обычно предусматривают расположение скважин по их краям и в центре.

Размещение скважин должно обеспечить возможность определения деформаций основания в различных его точках, которые в той или иной степени характеризуют предельно возможные величины этих деформаций. Однако это — недостаточное решение вопроса, поскольку проектировщиков интересует не вообще максимальная (или минимальная) осадка в любой точке (в плане) основания, а осадка в точке, в которой фундамент способен перемещаться и это перемещение может привести к его деформациям.

Глубины скважин зависят от принципа использования вечноммерзлых грунтов в качестве оснований и определяются в об-

шем мощностью термоактивной зоны. Если под активной зоной понимается зона, в пределах которой грунты оснований находятся в напряженном состоянии под воздействием веса здания или сооружения, то термоактивной зоной следует считать область основания, в которой происходят явные изменения температуры грунтов в результате строительства и эксплуатации зданий и сооружений.

Образующаяся в некоторых случаях под зданиями и сооружениями талая зона носит название чаши оттаивания. Последняя составляет верхнюю часть термоактивной зоны. Изучение термоактивной зоны на всю ее глубину имеет первостепенное значение для прогнозирования температурного режима вечномерзлых грунтов оснований и для непосредственного обеспечения устойчивости зданий и сооружений.

При изысканиях линейных сооружений размещение скважин производится по оси сооружения. Расстояние между скважинами здесь может быть различным и зависит от степени изменчивости ИГМ условий. Кроме того, величина расстояния зависит и от характера линейного сооружения. Так, при прокладке линейных сооружений на опорах скважины целесообразно проходить в местах заложения опор. Размещение скважин по оси линейных сооружений следует производить в пределах ландшафтных районов (но не на их границах), что обеспечит возможность детального учета всех типов инженерно-геологических мерзлотных условий. Глубины скважин по осям линейных сооружений определяются глубиной термоактивной зоны.

Геофизические работы, как отмечалось, проводятся только по осям трасс линейных сооружений и заключаются в электропрофилировании и вертикальном электрическом зондировании. ВЭЗ производится только на трассах магистральных сооружений. Точки ВЭЗ размещаются у скважин (для получения опорных разрезов) и между ними — по 2—3 точки. Глубина зондирования должна быть не меньше глубины скважин.

Шурфовочные работы производятся при изысканиях как на площадках, так и на трассах, но не во всех случаях. Необходимость проходки шурфов возникает только тогда, когда нужно непосредственным образом определять механические свойства грунтов, т. к. монолиты мерзлых грунтов из скважин для этих целей, к сожалению, использовать нельзя. Незначительный диаметр (не более 168 мм) таких монолитов не обеспечивает возможности сохранения их в мерзлом состоянии при транспортировке в стационарные лаборатории. Отсутствие соответствующих термостатов и массовый характер опробования заставляют отбирать монолиты мерзлых грунтов значительно больших размеров (в 3—4 раза), чем это требуется для их лабораторных исследований, т. е. такие монолиты отбираются только из шурфов. Это дает возможность обеспечить мерзлое состояние ядра таких образцов во время транспортировки. Шурфы проходятся также

при необходимости уточнения льдистости, если скважины не дают всей необходимой информации.

Надобность непосредственного определения механических свойств грунтов возникает, когда техническим проектом предусмотрено использование грунтов в пластичномерзлом, а также в оттаивающем при эксплуатации состоянии и с использованием предпостроечного оттаивания грунтов. Если же грунты при эксплуатации зданий и сооружений будут находиться в твердомерзлом состоянии, то необходимость в определении их механических свойств отпадает, поскольку для твердомерзлых грунтов их нормативные прочностные характеристики регламентируются нормативными документами (СНиП II-Б.6—66), и, кроме того, такие грунты считаются практически несжимаемыми, что позволяет не производить их расчета по деформациям.

Необходимость проходки шурфов определяется также предусмотренными в техническом проекте типами фундаментов. При висячих свайных фундаментах, например, не нужно определять механические свойства грунтов, т. к. расчет свай производится по данным их испытаний опытными нагрузками, а для твердомерзлых грунтов в этих случаях механические характеристики берутся по таблицам (понятие условного фундамента при кустовом расположении висячих свай в вечномерзлых грунтах не используется).

В оттаивающих при эксплуатации грунтах висячие свайные фундаменты, как правило, не используются вообще. Если же техническим проектом предусмотрено применение предпостроечного оттаивания и висячих свай после этого, то для отбора монолитов шурфы проходить нужно. Проходка шурфов предусматривается и во всех остальных случаях. В твердомерзлых грунтах может возникнуть необходимость проходки шурфов для контроля льдистости, изучения криогенных текстур грунтов, если они недостаточно четко определяются при бурении.

Следует также иметь в виду еще одно обстоятельство. Допустим, технический проект предусматривает сохранение вечномерзлого состояния грунтов оснований и по прогнозу эти грунты в основном будут находиться в твердомерзлом состоянии. Но в течение года различные горизонты этих грунтов вследствие естественных годовых колебаний температуры могут находиться какую-то, пусть незначительную, часть времени в пластичномерзлом состоянии. Или же только часть этих грунтов (верхние горизонты разреза) очень незначительное время будет пластичномерзлой. Такие грунты при планировании изыскательских работ следует рассматривать как пластичномерзлые.

Во всех приведенных выше случаях определения необходимости проходки шурфов имелась в виду вертикальная нагрузка от зданий и сооружений на грунты. Если же фундаменты передают горизонтальную нагрузку или они ограничены вниз идущими откосами, то шурфы следует предусматривать во всех слу-

чаях, кроме использования грунтов в твердомерзлом состоянии, т. к. фундаменты в этих случаях приходится рассчитывать по устойчивости. Глубина шурфов определяется мощностью сжимаемой толщи грунтов (активной зоны).

Иногда шурфы приходится проходить вместо скважин, если по тем или иным причинам бурение скважин нецелесообразно, например, когда поднимаемый из скважин керн затрудняет качественную документацию грунта.

Следует отметить, что проходка шурфов в мерзлых грунтах является достаточно трудоемкой и до настоящего времени очень слабо механизирована. Поэтому не следует допускать даже незначительного завышения объемов шурфовочных работ. Планирование их при изысканиях должно быть строго обоснованным.

При изысканиях на площадках шурфы размещаются между скважинами. Местоположение шурфов не должно совпадать с контурами фундаментов — шурфы следует смещать, чтобы не создавать ослабленных зон грунта у фундаментов.

При изысканиях линейных сооружений шурфы закладываются, как правило, близ проектируемых опор. При безопорной прокладке (наземной, полуподземной) вопрос о размещении шурфов и о целесообразности их проходки вообще следует решать на основе тщательного анализа предусмотренного техническим проектом характера совместной работы сооружения с грунтами.

Дело в том, что в этих случаях нагрузки на грунты, как правило, незначительны. Это объясняется тем, что нагрузки распределяются по длине сооружения и при увеличении его диаметра пропорционально возрастает площадь опирания на грунт. Поэтому для оттаивающих при эксплуатации оснований может оказаться целесообразным определение их деформационных свойств по физическим характеристикам. В пластичномерзлых грунтах появляется возможность использовать единичные определения деформационных характеристик на основе районирования ИГМ условий. Поэтому планировать шурфовочные работы при изысканиях линейных сооружений следует совместно с проектировщиками.

Опытные полевые работы проводятся для определения:

а) деформаций пластичномерзлых грунтов под нагрузкой;
б) деформаций оттаивания и уплотнения под нагрузкой оттаявших грунтов;

в) несущей способности (и осадки) висячих свай в пластичномерзлых грунтах или несущей способности этих свай в твердомерзлых грунтах, когда возникает проблема ее повышения сравнительно с полученной расчетом по табличным данным СНиП II-Б.6—66.

В первых двух случаях задачи опытных работ полностью совпадают с задачами, для решения которых в конечном итоге

проходятся шурфы. В этих случаях опытные полевые работы выполняются, когда по тем или иным причинам невозможен отбор монолитов из шурфов или же монолиты не могут быть использованы для определения деформаций грунтов в лаборатории. Чаще всего такое положение возникает при работах на льдонасыщенных грунтах со значительным содержанием обломочного материала. Количество точек производства опытных полевых работ для определения осадок грунтов и размещение этих точек в принципе те же, что и для шурфов.

Висячие сваи в пластичномерзлых грунтах испытываются в контурах проектируемых зданий и сооружений. Количество точек этих испытаний (в плане) и их размещение целиком зависят от степени неоднородности ИГМ условий участка здания или сооружения. При планировании опытных полевых работ, учитывая их трудоемкость, длительность и высокую стоимость, следует тщательно обосновывать их объемы, используя по возможности метод аналогий.

В некоторых случаях может возникнуть необходимость определения нормативных значений сопротивлений мерзлого грунта нормальным давлениям и сдвигам по поверхностям фундаментов, а также удельных касательных сил пучения. Такие работы не характерны для стандартных изысканий и потому их объемы, а также распределение по участкам зданий и сооружений должны устанавливаться на основе консультаций с проектирующими организациями.

Термокаротажные работы ведутся во всех скважинах, пройденных на участках зданий и сооружений, или в шурфах, если они пройдены вместо скважин.

Лабораторные работы по перечню определяемых свойств грунтов дифференцируются в зависимости от принципа использования вечномерзлых грунтов в качестве оснований, температурно-прочностного состояния этих грунтов, а также от вида фундаментов. Дополнительно при этом учитывается направление нагрузок в основном сочетании и характер планировки прилегающих к фундаментам участков.

Независимо от всех этих факторов определяются лишь гранулометрический состав, пластичность (для связных грунтов), объемный вес, удельный вес, суммарная влажность грунтов и льдистость за счет ледяных включений.

Все эти характеристики определяют для грунтов, встречаемых как в мерзлом, так и в талом состоянии (кроме льдистости — для талых грунтов). Если грунты в процессе эксплуатации здания или сооружения будут находиться в твердомерзлом состоянии, то в определении механических свойств грунтов нет нужды. Лабораторные исследования твердомерзлых грунтов должны обеспечить лишь прогнозирование температурного режима грунтов. Они состоят из определения суммарной влажности; относительной льдистости; объемного веса.

Грунты, используемые в качестве оснований в пластично-мерзлом состоянии, рассчитываются по деформациям, а также по устойчивости, если основания ограничены вниз идущими откосами или же фундаменты передают горизонтальную нагрузку. Расчет фундаментов по устойчивости на воздействие сил пучения осуществляется на основе табличных данных. Для расчета по деформациям (кроме случаев применения висячих свай) находят нормативное значение предельно-длительного сцепления пластично-мерзлого грунта; коэффициент сжимаемости пластично-мерзлого грунта.

Кроме того, определяют и рассчитывают перечисленные выше характеристики грунтов, необходимые для прогнозирования их температурного режима. Если необходимо рассчитывать основания по устойчивости, то дополнительно к изложенному определяют предельно-длительное значение угла внутреннего трения пластично-мерзлого грунта.

Для грунтов оснований, оттаивающих в процессе эксплуатации зданий и сооружений, производят те же расчеты, что и для пластично-мерзлых грунтов: определяют относительное сжатие таких грунтов при оттаивании под нагрузкой, а также угол внутреннего трения и сцепления для такого состояния плотности и влажности этих грунтов, которое они будут иметь после оттаивания.

Для прогнозирования температурного режима грунтов оснований определяют те же свойства грунтов, что и в предыдущих случаях.

Если грунты предусматривается использовать в оттаявшем состоянии, то для них определяют те же механические свойства, что и при изысканиях в обычных условиях.

Относительную льдистость и теплофизические характеристики для талых грунтов можно рассчитывать и принимать в соответствии с данными СНиП II-Б.6—66.

Как для оттаивающих в процессе эксплуатации, так и для предварительно оттаянных грунтов всегда определяется их объемный вес в воздушно-сухом состоянии при уплотнении, соответствующем нагрузке от веса здания или сооружения и веса грунта на глубине отбора образца.

Изложенное относится, главным образом, к изысканиям для зданий и сооружений нелинейного характера. Перечень определяемых характеристик для линейных сооружений остается таким же, но механические свойства, указанные выше, непосредственным образом определяются не всегда, т. к. в основном от линейных сооружений передаются на грунты незначительные нагрузки, и грунты в этих случаях менее чувствительны к осадкам по сравнению с обычными зданиями и сооружениями. При этом надо учитывать, что сооружения нелинейного характера, входящие в состав линейных сооружений, во всем, что касается изысканий для проектирования их оснований и фундаментов,

следует рассматривать как обычные. К таким сооружениям относятся различные опоры, колодцы, здания и т. п. На такие сооружения в полной мере распространяются также и положения СНиП II-Б.6—66.

Отчетные материалы по изысканиям для рабочих чертежей должны содержать подробный перечень значений всех характеристик грунтов и ИГМ условий, которые были установлены по участку каждого конкретного здания и сооружения, необходимых для расчета их оснований и фундаментов в соответствии с техническим проектом, а также материалы прогнозирования температурного режима грунтов оснований. Свойства грунтов, используемые для расчета оснований и фундаментов, должны определяться с учетом наиболее неблагоприятных температур, принимаемых грунтами (по прогнозу) на соответствующих глубинах при эксплуатации зданий и сооружений. Масштаб отчетных картографических материалов должен быть не мельче 1:2000, а для магистральных сооружений — не мельче 1:5000. Подробный перечень отчетных материалов приведен в нормативных документах на инженерно-геологические изыскания [38, 39, 40].

МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ РАБОТ**§ 1. МЕРЗЛОТНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ**

Мерзлотное обследование является комплексом различных видов работ, перечень которых видоизменяется в зависимости от назначения обследования и этапа инженерно-геологических изысканий. В числе этих видов работ могут быть аэровизуальные, буровые, геофизические и термокаротажные работы, методика которых описывается ниже. Однако основная составляющая всякого мерзлотного обследования — аэровизуальное или наземное изучение территории с целью ее ландшафтного районирования и дешифрирования. Материалы же, получаемые с помощью прочих видов работ, сопоставляются с материалами аэровизуального и наземного обследования, что и дает возможность инженерно-геологической оценки территории, выражающейся в ее инженерно-геологическом районировании, выполняемой на основе ландшафтного районирования местности.

Было бы неправильно сводить обследование только к районированию и дешифрированию ландшафтов, т. к. в ходе его получают и непосредственные сведения о составляющих инженерно-геологической обстановки, например о большинстве мерзлотных физико-геологических процессов и явлений. Правда, эти процессы и явления, представляя собой упомянутые элементы инженерно-геологической обстановки, т. е. ИГМ условия, в то же время составляют внешние компоненты ландшафта. Тем не менее при мерзлотном обследовании по косвенным признакам часто устанавливают и те ИГМ условия, которые непосредственно в ландшафте не выражаются.

Предполевые работы

Любое мерзлотное обследование, как это отмечалось, начинается с предполевого районирования и дешифрирования ландшафтов, причем если по району исследований известны связи между составляющими ландшафтов и ИГМ условиями, то ландшафтное дешифрирование становится и инженерно-геологическим. Однако основной целью предполевых работ является именно ландшафтное районирование. Даже ландшафтное дешифрирование подчинено этой цели, т. к. идентификация ландшафтных районов, участков и т. п., выделенных на аэрофотоснимках,

сделанных в различных условиях, без знания дешифровочных ландшафтных признаков не всегда возможна.

Учитывая это последнее обстоятельство, следует сформулировать основную задачу предполевого мерзлотного обследования как выделение набора различных ландшафтных элементов. Систематизация выделенных элементов, т. е. в данном случае установление среди них однородных, так же как и выделение участков распространения мерзлотных физико-геологических процессов и явлений, производится лишь по возможности.

В качестве рабочего материала для предполевого обследования используются плановые аэрофотоматериалы. Удобнее всего работать на фотосхемах, представляющих собой смонтированные без перекрытия плановые аэрофотоснимки участка местности определенных размеров. Масштаб аэрофотоматериалов может быть различен. При обследовании значительных территорий, например при изысканиях для ТЭО или технического проекта магистральных линейных сооружений, масштаб должен быть не мельче 1 : 60 000.

При мерзлотном обследовании, конечной целью которого является выбор площадки строительства, наиболее целесообразно использование материалов масштабов 1:10 000 — 1:30 000 в зависимости от размеров обследуемого района, величины площадки и дифференцированности ландшафта. Не следует думать, что более крупный масштаб аэрофотоматериалов всегда лучше. В этих случаях появляется опасность, что перегруженность всевозможными деталями затруднит схематизацию ландшафтов. Вопрос об оптимальном масштабе аэрофотоматериалов для различных условий еще ждет своего решения.

В процессе предлевых работ целесообразно использовать перспективные аэрофотоснимки, являющиеся, по существу, основным источником дешифровочных ландшафтных признаков. Однако получение таких снимков возможно, к сожалению, не всегда. Поэтому при районировании ландшафта на аэрофотосхемах параллельно изучаются так называемые стереопары, представляющие собой два плановых аэроснимка, которые частично перекрывают друг друга. Рассмотрение таких снимков с помощью стереоскопа позволяет получить стереоскопический эффект и, особенно на крупномасштабных снимках, достаточно уверенно дешифрировать внешние компоненты ландшафтов.

Вообще же схематизацию или районирование ландшафтов на аэрофотоматериалах ведут по структуре и тону изображения. Признаки эти для одного и того же участка местности могут изменяться (например, если изучаются аэрофотоснимки, сделанные в разное время года или даже в одно и то же время, но в разных погодных условиях). Влияют также и чисто технические моменты аэрофотосъемки и обработки материалов. Поэтому, во-первых, необходимо стремиться к тому, чтобы используемые аэрофотоматериалы были получены при одном залете или же не-

скольких залетах, выполненных без значительного перерыва между ними. Во-вторых, при районировании следует привлекать всевозможные вспомогательные материалы и использовать косвенные признаки, а, в-третьих, районирование и дешифрирование аэрофотоматериалов в обязательном порядке нужно выполнять под руководством опытного специалиста по аэрометодам, предварительно ознакомившегося с районом работ хотя бы по литературным или фондовым материалам. Для детального ознакомления с этими вопросами читателю рекомендуется обратиться к работе И. В. Протасьевой [29].

Ландшафтное районирование начинается с выделения участков, принадлежащих к различным геоморфологическим уровням. Границей между такими участками служит более или менее четко выраженный в рельефе уступ, прослеживающийся либо до границ листов аэрофото- или топографических материалов, либо образующий замкнутые формы (останцы) в пределах этих листов. Различные геоморфологические элементы успешнее всего можно выделить при одновременном изучении аэрофотосхем, стереопар и топографической основы. Это обусловлено тем, что упомянутые уступы могут быть местами размывы и определение их положения возможно лишь на основе тщательного анализа общих тенденций изменения рельефа на этих участках и его деталей. Топографическая основа в данном случае дает возможность определить как раз эти общие тенденции, аэрофотосхема — участки, относящиеся к различным геоморфологическим уровням, которые в принципе должны отличаться по структуре и тону фотоизображения, а стереопары могут позволить выявить собственно уступ, который при составлении топографической основы не был отражен, и именно в том месте, на котором ему следует быть согласно анализу топоосновы и аэрофотосхем. В то же время любой уступ, замеченный на стереопарах, должен быть во избежание ошибок сопоставлен с топоосновой и аэрофотосхемами.

Собственно ландшафтное районирование ведут в пределах выделенных геоморфологических элементов. Один или одинаковые ландшафтные районы не могут быть расположены на различных геоморфологических элементах, т. к. одни и те же внешние компоненты ландшафта на них в принципе соответствуют различным ИГМ условиям.

При ландшафтном районировании, выполняемом непосредственно на аэрофотосхемах, в качестве ландшафтных подразделений выделяются участки, в пределах которых наблюдаются одинаковые структуры и тон фотоизображения или же вполне устойчивые комбинации элементов, отличающихся по структуре и тону друг от друга. Комбинации выделяются при незначительных размерах (в масштабе аэрофотосхемы) отдельных элементов ландшафта и только в случае их устойчивого сочетания в пределах участков, которые по своим размерам вполне

выделяются на аэрофотосхеме. Следует отметить, что если комбинации элементов прослеживаются на значительных или разобщенных участках, то можно сделать предположение о наличии их закономерной ассоциации, что, в свою очередь, позволяет предположить наличие однородных ландшафтов и, следовательно, ИГМ условий.

Это же положение, отнесенное к вполне одинаковым (монотонным и моноструктурным) участкам, может быть и ошибочным, если их идентичность окажется фиктивной вследствие ошибок дешифрирования, обусловленных чисто техническими причинами. Вероятность ошибок при наличии устойчивых комбинаций различных элементов резко уменьшается. Вот почему также целесообразными оказываются поиски на аэрофотоматериалах устойчивых комбинаций различных монотонных участков, которые самостоятельно выделяются на этих материалах, так как в итоге это может помочь выделению при полевых работах ландшафтных, а впоследствии и инженерно-геологических подразделений более высокого ранга.

После ландшафтного районирования выделенные ландшафтные подразделения переносятся на топографическую основу, масштаб которой обычно несколько мельче масштаба аэрофотоматериалов (в частности, масштабу топоосновы 1:100 000 соответствует масштаб аэрофотоматериалов 1:60 000). Неизбежно часть выделенных на схемах ландшафтных подразделений может в масштабе топоосновы и не выразиться. Поэтому от того, насколько правильно будут найдены закономерные сочетания таких участков, зависит в целом объективность карты ландшафтного районирования. Она будет тем объективней, чем устойчивее в пределах изучаемой территории эти сочетания, причем даже чисто формальное выделение таких комбинаций может оказаться в высшей степени эффективным.

Часто уже в ходе предполевых работ появляется возможность выделить участки распространения мерзлотных физико-геологических процессов и явлений. Ниже приводятся некоторые наиболее общие их дешифровочные признаки, используемые как при предполевых, так и при полевых работах.

Современный термокарст чаще всего представляет собой озера неправильной формы с изрезанными берегами, т. е. образуются они при вытаивании подземных, часто жильных льдов и повторяют их очертания. По мере увеличения возраста термокарстовых образований берега озер становятся плавными, сами озера зарастают, иногда пересыхают. В местах, где подземные льды были развиты на значительных участках, наблюдается смыкание озер и по мере завершения термокарстового процесса происходит образование обширных уплощенных понижений — аласов. Участки древнего заверщенного термокарста, образованные на месте залегания жильных льдов, представляют собой систему минеральных останцов — байджарахов. При изы-

сканиях интерес представляют участки именно современного термокарста, т. е. такие, где термокарстовый процесс происходит в настоящее время.

Термоэрозия происходит при вытаивании подземных льдов на участках, имеющих уклон, и сопровождается выносом оттаявшего материала. Очень часто термоэрозионные процессы начинаются по мере разработки термокарстовых форм, образующих локальные базисы эрозии. Поэтому к термокарстовым озерам, как правило, примыкают так называемые полосы стока, представляющие собой своеобразные каналы, заполненные разжиженной грунтовой массой и заросшие сверху мхами. Можно предположить, что наиболее вероятной причиной, вызывающей образование термокарстовых и термоэрозионных форм, является морозобойное растрескивание грунтов, т. к. полосы стока образуют своеобразные многоугольники (полигоны), в узлах которых находятся термокарстовые озера. Морозобойные же трещины образуют именно систему полигонов. Кроме того, эти трещины являются коллекторами талых и атмосферных вод, обладающих отепляющим воздействием на грунты. В некоторых случаях непосредственно трещины вскрывают подземные льды или льдонасыщенные грунты. С другой стороны, необходимо отметить, что именно по морозобойным трещинам происходило образование подземных льдов вследствие замерзания попадавшей в эти трещины воды.

Термокарстовые озера и полосы стока образуются главным образом на водораздельных пространствах. Полосы стока на снимках образуют систему полигонов и отличаются более темным тоном по сравнению с окружающими участками вследствие большей увлажненности. Термоэрозионные формы возникают также в долинах рек вследствие тех же причин, что и образование оврагов. Дешифрируются они так же, как овраги.

Термокарстовым озерам часто сопутствуют многолетние бугры пучения, для роста которых необходима вода. Дешифрирование этих образований обычно не представляет трудностей, т. е. на снимках, а тем более на местности (с воздуха) отчетливо устанавливаются куполовидные возвышения. В зоне лесотундры на растущих буграх пучения часто фиксируется так называемый «пьяный» лес — наклоненные в разные стороны деревья. Иногда бугры пучения встречаются в долинах водотоков, непосредственно примыкая к ним.

Оползни, сплывы и обвалы образуются в долинах рек, водотоков и реже — по берегам озер и достаточно определенно устанавливаются на снимках по наличию трещин, параллельных склонам, «пьяному» лесу, оплывшим или обрушенным массам грунта, лишенным растительности, и другим признакам.

Процессы солифлюкции отдешифрировать практически очень трудно. Солифлюкционные террасы дешифрируются путем тщательного геоморфологического анализа речных долин.

Иногда на снимках отчетливо видны и просто оплывшие массы грунтов.

На леди, как правило, на летних снимках непосредственно не наблюдаются. Однако их очертания обычно достаточно хорошо устанавливаются по угнетенной травяной растительности, грязевым покровам, отсутствию леса и кустарника. Признаком наледей являются выходы на поверхность подземных вод.

Подземные льды на снимках непосредственным образом практически не устанавливаются. Участки их вероятного распространения определяют лишь по косвенным признакам. В частности, к ним относят участки, где развиты торфяники, морозобойные трещины или вообще полигональные образования. Кроме того, это участки, где развиты термокарстовые и термоэрозионные формы, а также бугры пучения. Все эти процессы и явления, как можно заметить, в основном пространственно связаны друг с другом. Поэтому при дешифрировании на водораздельных пространствах следует искать термокарстовые озера, полигоны и бугры пучения, а в речных долинах — обвально-оползневые формы, бугры пучения и следы наледей.

На карту ландшафтного районирования, помимо участков распространения мерзлотных физико-геологических процессов и явлений, можно в некоторых случаях нанести и другие опасные для строительства участки. В частности, по материалам государственных геологической и гидрогеологической съемок на карту ландшафтного районирования наносят: участки тектонических нарушений; участки распространения подземных вод с близким к поверхности залеганием водоносных горизонтов; участки водопоявлений.

Материалы геологической и гидрогеологической съемок позволяют также нанести на карту ландшафтного районирования геоморфологические элементы, литологию, возраст и генетическую характеристику грунтов. Правда, геологическая и гидрогеологическая карты, которые используются при предполетных работах, имеют, как правило, более мелкий масштаб по сравнению с используемой топоосновой. Поэтому, к сожалению, снятые с этих карт данные будут достаточно схематичными. В полной мере это соображение относится к данным о распространении и мощности вечномерзлых грунтов, которые показываются на отчетных картах гидрогеологической съемки. Кроме того, на таких картах именно эти данные могут быть результатом недостаточно обоснованных обобщений. Тем не менее использование упомянутых материалов позволяет получить достаточно отчетливое представление о геолого-гидрогеологических условиях района работ и об общих закономерностях распространения в нем вечномерзлых грунтов.

Подготовленная карта ландшафтного районирования используется для планирования производства полевого мерзлотного обследования. На этой карте или на топооснове такого же мас-

штаба составляется схема аэровизуальных или наземных маршрутов, покрывающих всю территорию исследований. При аэровизуальном методе обследования расстояние между осями соседних маршрутов обычно устанавливается равным 4—6 км (подразумевается, что при полете по маршруту дешифрируется полоса именно такой ширины, т. е. 2—3 км по обе стороны от осевой линии аэровизуального маршрута).

Планируя наземное обследование, расстояние между осями маршрутов устанавливается таким, чтобы обеспечить возможность надежного визуального дешифрирования всей территории. Расстояние между осями наземных маршрутов существенно зависит от степени пересеченности местности и ее залесенности.

При аэровизуальном обследовании трасс линейных сооружений по каждому варианту намечается один маршрут, который должен совпадать с осью трассы. При наземном обследовании маршруты планируются таким образом, чтобы охватить всю полосу каждого варианта трассы, ширина которой устанавливается в зависимости от характера проектируемого сооружения.

Полевые работы

В начале полевых работ независимо от того, каким методом (аэровизуальным или наземным) будет производиться обследование территории, совершается ее рекогносцировочный облет, в процессе которого устанавливается общее соответствие предварительной карты ландшафтного районирования природным условиям района; уточняются основные ландшафтные типы местности и участки, наиболее сложные для воздушного дешифрирования; участки с однообразным ландшафтом; определяются условия проходимости местности. На основе результатов этого облета корректируется схема маршрутов аэровизуального или наземного обследования.

При аэровизуальном обследовании каждый маршрут разбивается на участки длиной 30—40 км, представляющие собой оптимальную дневную норму аэровизуального обследования для тундры и лесотундры. Если участки характеризуются однородным ландшафтом, ежедневная норма может быть увеличена; если сложным — уменьшена. На каждом дневном маршруте должны быть дополнительно выполнены наземные работы еще в 10—12 точках, проводимые в наиболее характерных пунктах обследуемого участка. Среднее расстояние между этими точками составляет 3—4 км; его изменяют в зависимости от степени изменчивости ландшафта. Основное время при аэровизуальном способе обследования затрачивается именно на выполнение наземных работ, включая время на подбор площадок с воздуха.

В пределах полосы каждого дневного маршрута на топооснове намечаются точки посадок, т. е. точки наземных работ.

Полоса местности, осью которой является ось маршрута, дешифрируется при полете от начальной до конечной точек маршрута, а выбор площадок, посадки и наземные работы выполняются при обратном полете.

При планировании аэровизуальных маршрутов следует по возможности избегать «холостых» полетов над уже отдешифрированной территорией. Это не такая уж легкая задача, если полеты осуществляются только с одной базы. В зависимости от размеров территории целесообразно иметь 2—3 базы, допускающие посадку и заправку транспортных средств, а также ночной отдых их экипажей.

Рекогносцировочный облет территории можно вести с любого авиатранспорта, позволяющего летать со скоростью не более 100—150 км/ч при высоте полета порядка 300—500 м и обеспечивающего удобное наблюдение за местностью. Для аэровизуальных маршрутов возможно использование только вертолетов. Лучше всего подходят вертолеты типа МИ-4 или аналогичные. Вертолет должен допускать транспортировку 600—800 кг груза, в том числе персонала и оборудования, и обеспечивать полет на расстояние 400—500 км при 10—12 посадках, осуществляемых с подбором площадок с воздуха.

Аэровизуальные маршруты эффективнее всего осуществляются при скоростях полета не более 100—120 км/ч при высотах порядка 100—150 м. При этих условиях обеспечивается уверенное дешифрирование местности в полосе шириной порядка 4—6 км.

Аэровизуальное дешифрирование выполняется тремя бортнаблюдателями, каждому из которых в случае необходимости придается помощник для записи наблюдений. Старший наблюдатель контролирует полет по маршруту и во время полета занимается дешифрированием средней полосы местности по оси маршрута, боковые наблюдатели ведут дешифрирование справа и слева от оси. Перед полетом на карту каждого наблюдателя, а также на полетную карту пилота наносится очередной маршрут, разбитый контрольными точками на отрезки длиной в 5 км. Масштаб полетной карты должен быть не мельче 1:100 000). При пролете вертолета над начальной, контрольными и конечной точками маршрута пилот подает звуковой сигнал (сирену), позволяющий наблюдателям «привязывать» к местности контурные точки топоосновы, сверять их по контрольным точкам и вести километровое описание составляющих ландшафта — растительности, в том числе мохового покрова; рельефа; мерзлотных физико-геологических процессов и явлений; характера состава грунтов (органические или минеральные).

Во время обратного полета старший наблюдатель определяет места посадки вертолета для производства наземных дешифровочных работ. Пункты посадки выбираются в зависимости от нужд дешифрирования как в пределах ландшафтных подразде-

лений, так и на их границах. Следует отметить, что основную часть этих пунктов следует выбирать на наиболее характерных участках ландшафтных разностей.

В каждом пункте посадки описываются: растительность; рельеф; мерзлотные физико-геологические процессы и явления; литологические особенности грунтов. Одновременно устанавливаются глубины сезонного оттаивания (промерзания) на момент исследований, температурное состояние грунтов (талые или мерзлые) и по возможности — мощность вечномерзлых грунтов. Глубина сезонного оттаивания (промерзания) определяется большей частью путем непосредственного зондирования, например при помощи «бура геолога».

Температурное состояние, а также мощность вечномерзлого грунта или, по крайней мере, его наличие до глубины порядка 40—50 м устанавливают оценкой величины удельного электрического сопротивления грунтов, производимой с помощью ВЭЗ, с разностями питающих электродов от 10—20 до 150—250 м.

При воздушном дешифрировании и наземных работах в качестве рабочих материалов используются аэрофотоснимки, аэрофотосхемы, карта ландшафтного районирования и топооснова. Записи ведутся в соответствующих журналах.

Наземный способ мерзлотного обследования отличается от воздушного тем, что вся территория дешифрируется с земли, как правило с использованием вездеходного транспорта. При наземном обследовании также выбирают специальные точки, в которых производят детальное описание ландшафта и определение глубины сезонного промерзания или оттаивания грунтов, а также наличия и мощности вечномерзлых грунтов.

В итоге мерзлотного обследования устанавливается соответствие внешних компонентов ландшафта некоторым ИГМ условиям, в частности составу грунтов, их характеру (вечномерзлые или талые), а также устанавливаются участки, являющиеся неблагоприятными для строительства. Карта ландшафтного районирования, таким образом, дешифрирует некоторые ИГМ условия, и ее можно считать с некоторым допущением картой инженерно-геологического районирования.

§ 2. БУРОВЫЕ РАБОТЫ

Бурение инженерно-геологических скважин в мерзлых грунтах имеет ряд особенностей, обусловленных необходимостью сохранения отбираемых из скважин образцов грунта в естественном состоянии, т. е. с ненарушенным строением и влажностью, а также сохранения близкого к естественному температурного режима грунтов.

Необходимость сохранения естественного строения грунтов требует применения одного лишь колонкового бурения или, в крайнем случае, забивных стаканов при условии проходки всего

разреза скважины только с их помощью. Применение при бурении всякого рода ложек, змеевиков, шнеков совершенно исключается, т. к. в этом случае практически невозможна документация ледяных включений, а, кроме того, невозможен и отбор монолитов мерзлого грунта.

Естественный температурный режим грунтов при бурении изменяется из-за привнесения тепла в скважину буровым снарядом, а также вследствие неэффективного отвода тепла из нее. При вращательном бурении отепление происходит за счет трения снаряда о стенки скважины и в меньшей степени — при разрушении мерзлого грунта буровым наконечником. При ударном бурении трение и выделение тепла за счет трения значительно меньше, чем при вращательном. Однако в массовом порядке ударное бурение не применяется вследствие ряда причин. Прежде всего легкие ударные установки типа УБП-15 не обеспечивают проходки скважин в мерзлых грунтах на требуемую глубину (хотя бы 12—15 м), их мощности не хватает для извлечения снаряда из скважины, а забивные стаканы, встречая необычно высокое сопротивление мерзлого грунта, быстро деформируются и становятся непригодными. Тяжелые установки ударного бурения типа УКС-22 крайне громоздки, неудобны при транспортировке в районах с плохой проходимостью и не приспособлены для бурения забивными стаканами.

Основным способом бурения остается механическое вращательное бурение, реже применяется ручное ударно-вращательное бурение. При ручном ударно-вращательном бурении в качестве бурового снаряда используется колонковая труба с твердосплавными победитовыми коронками. Всякого рода грунтоносы не находят применения в процессе бурения мерзлых грунтов, т. к. колонковые трубы позволяют извлекать образцы с ненарушенной структурой и криогенной текстурой.

Для уменьшения трения бурового снаряда о стенки скважины при механическом бурении применяют колонковые трубы уменьшенной длины (до 1—1,5 м) и ребристые коронки. Тепловыделение за счет трения также уменьшают, ограничивая число оборотов бурового снаряда до 12—25 об/мин и длину проходки на 1 рейс — до 0,2—0,3 м. При ручном ударно-вращательном бурении таких ограничений не вводят.

Для отвода тепла из скважин можно их промывать или продувать. Однако применение для этой цели воды или обычных глинистых растворов полностью исключается, так как это приведет не только к отеплению, но и к оттаиванию керна и грунта по стенкам скважины. Нельзя допускать даже подлива воды в скважину. Применение охлажденных до отрицательных температур солевых растворов также недопустимо вследствие того, что привнесение солей в мерзлые грунты изменяет температуру их оттаивания и приводит к изменению их теплофизических и

механических свойств. Образцы, полученные из скважин, пробуренных с применением солевых растворов, не могут по этой причине использоваться для лабораторных определений свойств грунтов.

Бурение с продувкой воздухом повышает производительность проходки скважин. Однако высокие расходы воздуха при бурении приводят к возникновению усиленного теплообмена воздуха с грунтом. Уменьшить теплообмен можно, если температура используемого для продувки воздуха будет близка к температуре грунта. Добиться такого положения крайне сложно, особенно если учесть, что температура грунтов во времени и по глубине меняется, а регулировать температуру подаваемого воздуха трудно. Применение продувки приводит к изменению температурного режима грунтов в скважине, степень которого оценить затруднительно. Вот почему продувка применяется ограниченно и только в тех случаях, когда скважины можно после бурения выдерживать достаточно долго, чтобы в них восстановился естественный температурный режим.

Если во время бурения встретятся водоносные горизонты, их необходимо перекрыть, чтобы грунтовые воды не попали в скважину. Наиболее надежно это можно сделать путем тампонажа скважин цементом с последующей разбуркой цементной пробки. Перекрытие водоносных горизонтов обсадными трубами не всегда приносит желаемые результаты, поскольку после обсадки часто возникает циркуляция грунтовых вод по затрубному пространству, что приводит к существенному нарушению температурного режима грунтов и даже к их оттаиванию. Обсадные трубы целесообразно применять при проходке неустойчивых вечномерзлых грунтов, в частности сыпучемерзлых и иногда пластичемерзлых. Диаметр обсадных труб должен соответствовать диаметру бурения.

Чтобы в скважину не проникли поверхностные и надмерзлотные воды, слой сезонного оттаивания перекрывают кондуктором, забиваемым на глубину, равную полной глубине этого слоя плюс 0,5 м. Оголовок кондуктора должен быть выше устья скважины на 0,2—0,3 м. Диаметр кондуктора должен превышать диаметр бурения на 1,5—2 см.

Зимой естественный температурный режим грунтов может нарушиться из-за опускания в скважину холодного наружного воздуха. Последний может заполнить всю скважину, если во время перерывов в бурении или после окончания бурения ее устье не перекрывать.

Летом теплый наружный воздух в скважины, заполненные более холодным воздухом, не проходит. В это время надо только затенять устья скважин, предохраняя их от воздействия прямой солнечной радиации.

Итак, инженерно-геологические скважины в вечномерзлых грунтах следует проходить установками вращательного бурения

(или ручным ударно-вращательным комплектом), укороченными колонковыми трубами с ребристыми победитовыми коронками, всухую, укороченными рейсами, с незначительной скоростью вращения бурового снаряда. Эти правила могут не соблюдаться при проходке скальных вечномерзлых грунтов, которые не изменяют своих свойств ни при изменении температуры, ни при промывке обычными и солевыми растворами. Однако если скальные грунты выветрелые, то при инженерно-геологическом бурении в них применение всех указанных ограничений обязательно.

Диаметры бурения при проходке инженерно-геологических скважин находятся в пределах от 89 до 168 мм. Оптимальные диаметры 127—146 мм. Трубы диаметром 168 мм чаще всего используются в качестве кондукторов.

При мерзлотном обследовании ведут зондирование глубин промерзания или оттаивания грунтов. Зондировочные скважины можно проходить любым способом без каких-либо технологических ограничений. Целесообразнее всего применять для этих целей «бур геолога» или достаточно легкий переносный мотобур. Диаметр такого бурения обычно порядка 30—50 мм.

При бурении следует всячески избегать нарушения естественных условий на поверхности грунта, а после окончания бурения — по возможности их восстанавливать.

§ 3. ПРОХОДКА ШУРФОВ

Основная задача, для решения которой проходят шурфы, — отбор монолитов мерзлых грунтов. Шурфы также используются для документации ледяных включений и в некоторых случаях — для температурных наблюдений. Если проходка скважин не обеспечивает получение необходимых образцов грунта, то вместо них также проходят шурфы. Дело это весьма трудоемкое. Осуществляется проходка в основном вручную, т. к. шурфо-буровых установок для вечномерзлых грунтов не существует, а иная механизация проходки применяется редко. Кроме того, приходится соблюдать ряд условий, вытекающих из целей проходки шурфов.

Как и при бурении скважин, в процессе проходки шурфов должны сохраняться естественное строение и свойства грунтов, отбираемых из шурфов. Что касается температурного режима грунтов, отбираемых в шурфе и залегающих в его стенках, то к его сохранению в естественном состоянии предъявляются менее жесткие требования, чем при проходке скважин. Прежде всего изменение температурного режима (но без оттаивания) монолитов вполне допустимо, т. к. при этом в них изменяется только содержание льда-цемента и незамерзшей воды, что не приводит к существенному изменению естественного строения грунтов. Поэтому их отрицательная температура может изме-

няться в достаточно широких пределах как при отборе, так и при транспортировке и хранении. Главное — не допускать оттаивания образцов, когда необратимо преобразуется их строение.

Монолиты, находившиеся при различных отрицательных температурах, будут обладать близкими к естественным механическими свойствами, если этим монолитам сообщить естественную отрицательную температуру, т. к. соответствующие количества льда-цемента и незамерзшей воды в них восстановятся.

Грунты, находящиеся в стенках шурфов при их проходке (и после нее), могут оттаивать, т. к. шурфы, как правило, для температурных наблюдений не используются. Поэтому при проходке шурфов следует предохранять от оттаивания забой перед отбором монолитов, а также стенки только на время документации ледяных включений.

Если шурфы проходят вместо скважин и их предполагается использовать для термокаротажных работ, пожоги, а также другие способы проходки, сопровождающиеся выделением тепла, ни в коем случае не должны применяться.

Вручную шурфы обычно проходятся с помощью кайл, клиньев и кувалд. Эффективна проходка шурфов отбойными молотками. В отдельных случаях допустима проходка шурфов с помощью взрывов. Вообще взрывной способ следует применять ограниченно, потому что шурфы, как правило, проходят при изысканиях для рабочих чертежей, т. е. на участках проектируемых зданий и сооружений, и неумелое применение этого способа может привести к ослаблению прочности грунтов оснований и даже к возбуждению термокарстового процесса.

Следует избегать попадания в шурфы поверхностных и грунтовых вод во время проходки и отбора образцов.

Шурфы следует крепить на полную глубину слоя сезонного оттаивания за исключением случаев, когда проходка производится зимой. При проходке несливающейся мерзлоты крепить стенки шурфов нужно до кровли вечномерзлых грунтов. На полную глубину шурфы крепятся при их проходке в неустойчивых вечномерзлых грунтах, т. е. в сыпучемерзлых и иногда — в пластичномерзлых, особенно при наличии в них крупных включений.

Во всех случаях следует избегать размещения шурфов непосредственно на участках заложения фундаментов, а иногда и вообще в контуре зданий и сооружений, т. к. шурфы ослабляют грунты оснований. Если шурфы предполагается использовать для термокаротажных работ, после их проходки естественные условия на поверхности грунтов восстанавливаются. Сечение таких шурфов должно быть минимально возможным.

Вопросы документации горных выработок и отбора образцов из них достаточно подробно освещены в нормативных документах и литературе [33, 34, 38].

§ 4. ТЕРМОКАРОТАЖНЫЕ РАБОТЫ

Термокаротажные работы выполняются для определения температурного режима грунтов в естественных условиях и получения исходных данных для прогнозирования этого режима в условиях строительства и эксплуатации проектируемых зданий и сооружений.

В принципе для решения этих задач каких-либо режимных наблюдений за температурой грунтов можно не проводить — для этих целей достаточно одновременных измерений. Однако для того, чтобы избежать ошибок, в частности по причине недостаточной выстойки скважин, в каждой точке наблюдений температуру грунтов измеряют несколько раз в течение определенного промежутка времени. Измеряют температуру грунтов в скважинах, а если последние по тем или иным причинам не проходились, — в шурфах. При наличии скважин термокаротаж в шурфах не выполняется.

Оборудование скважин для термокаротажных наблюдений заключается в их обсадке на полную глубину в неустойчивых вечномерзлых грунтах и перекрытии горизонтов грунтовых, в том числе и надмерзлотных вод. В обсаженных скважинах должна быть полностью исключена циркуляция грунтовых вод по затрубному пространству. Оголовок обсадных труб или кондуктора, выступающий над устьем скважины, следует оборудовать деревянным коробом с крышкой, чтобы предохранить от воздействия прямой солнечной радиации. Оголовок скважины также обваловывают талым глинистым грунтом, чтобы поверхностные воды не попадали в затрубное пространство.

Оборудование шурфов значительно более трудоемко, чем оборудование скважин. Предварительно подготавливают надежно герметизированную колонну обсадных труб диаметром не менее 168 мм, на забое заваренную или оборудованную пробкой. Эту колонну устанавливают в один из углов шурфа так, чтобы ее верхняя часть выступала над его устьем на 0,2—0,3 м. После этого шурф засыпают. Во всех случаях обратную засыпку производят оттаявшим грунтом с послойным его уплотнением. Засыпка мерзлым грунтом неэффективна — такой грунт трудно уплотнить и при оттаивании он даст существенную осадку, произойдет инфильтрация поверхностных вод, нарушение восстанавливающегося температурного режима. Все это вызовет необходимость дополнительной засыпки шурфа через какое-то время. Кроме того, не следует забывать, что шурф, засыпанный мерзлым неуплотненным грунтом, может стать инициатором термокарстового процесса. При засыпке шурфов, оборудуемых для термокаротажных работ, грунты его стенок с поверхности и на полную глубину сезонного оттаивания (при сезонном промерзании — до кровли вечномерзлых грунтов) нужно цементировать, чтобы избежать попадания фильтрующихся вод.

После оборудования скважины (шурфа) следует восстановить естественные условия на поверхности грунта, по крайней мере в радиусе, равном глубине выработки. В частности, надо восстановить естественный снежный и растительный покров, убрать извлеченный из выработок грунт, устранить колеи и ямы, вызванные перемещением транспортных средств, буровых агрегатов и других механизмов.

Оборудованные скважины и шурфы должны выстояться перед началом термокаротажа в них до тех пор, пока в грунтах, слагающих их стенки, не восстановится естественный температурный режим. Время, необходимое для этого, зависит от глубины и способа бурения, температуры, состава и суммарной влажности грунтов, а также и от времени года, и это время следует определять экспериментально. Однако существуют ориентировочные сроки, которыми можно руководствоваться при определении времени, потребного на термокаротажные работы. В частности, можно считать, что при ручном бурении до глубины 12—15 м скважина выстаивается 5—10 дней, а до глубины 20—25 м — 12—15 дней. Для механического колонкового бурения соответствующие сроки составят 12—15 и 25—30 дней.

Практически определяют, выстоялась ли скважина, путем сравнения значений температуры грунтов на соответствующих глубинах, полученных при трех измерениях температуры, сделанных с интервалом в 1 сутки на глубине от 5 м и ниже с интервалом в 1 м. Если разница значений температур на соответствующих глубинах не превышает 0,1 °С, то скважина считается выстоявшейся. Чтобы определить, выстоялся ли шурф, используют тот же прием, но сравнивают не 3, а 6 значений температур, т. е. время контроля увеличивается более чем вдвое, чтобы исключить возможность ошибок, вероятность которых для шурфов выше, чем для скважин.

Приведенный способ проверки основан на том, что на глубинах свыше 5 м естественные изменения температур за 2—5 суток практически никогда не превысят 0,1 °С, а восстановление температурного режима от измененного состояния до естественного происходит гораздо более быстрыми темпами.

После того как скважины или шурфы выстоялись, в них проводят термокаротажные работы. Измерения температуры проводят в каждой скважине (шурфе) по всему ее разрезу, причем в интервале глубин от 0 до 5 м — через каждые 0,5 м, от 5 до 20 м — через 1 м, а на глубинах свыше 20 м — через 2—5 м. В этих точках измерения температуры должны проводиться одновременно, практически не более чем за 5—10 мин.

Для того чтобы избежать ошибок и получить возможность уверенно судить о естественных температурах грунтов, проводят, как отмечалось, не одно измерение по разрезу каждой скважины, а 3 цикла измерений, по 3 измерения в каждом цикле, т. е. всего 9 измерений. Во избежание ошибок при использовании

дистанционного способа измерений температуры каждое измерение на всех глубинах повторяется трижды. Интервал времени между циклами измерений составляет 5—10 дней, а между измерениями в цикле — 1—3 дня.

В качестве датчиков температуры в практике изысканий применяются ртутные заливённые термометры, простые и дифференциальные термодары, а также полупроводниковые и металлические термометры сопротивления. Полупроводниковые термометры сопротивления называют также термисторами.

В литературе достаточно подробно рассматриваются качества упомянутых датчиков при их использовании для измерения температуры грунтов. Предпочтение отдается датчикам, обладающим высоким постоянством номинальных значений измеряемой величины и линейной зависимостью между измеряемой величиной и температурой. Последнее условие обеспечивает градуировку датчиков лишь при какой-либо одной температуре (например, при 0°C — в тающем льду).

Рис. 3. Монтажная схема косы
 1 — термометры сопротивления; 2 — автономные измерительные провода термометра; 3 — токовый провод термометра; 4 — переключатель типа ПМТ; 5 — пары измерительных клемм переключателя; 6 — общие клеммы переключателя; 7 — общие измерительные провода косы; 8 — измерительный прибор

Не останавливаясь на этом подробно, следует признать наиболее удачными металлические термометры сопротивления, которые надежны, очень просто градуируются и удобны в эксплуатации. Такие термометры монтируются по трехпроводной схеме, что исключает влияние сопротивления подводящих проводов на измеренные сопротивления. Применяются они с мостами постоянного тока класса 0,1—0,05, что обеспечивает точность измерений температуры соответственно 0,2—0,1 $^{\circ}\text{C}$. Схема измерительного комплекта из металлических термометров показана на рис. 3.

Непосредственно перед измерением температуры каждая коса должна выстояться в скважине не менее 3 ч для того, чтобы датчики приняли температуру окружающей их среды.

При использовании дистанционной схемы измерения дублирующие замеры производятся сразу же после основного. Если применяются ртутные термометры, а также и другие при недистанционной схеме измерения, дублирующие замеры не производятся.

В итоге проведения термокаротажных работ по каждой скважине по всему ее разрезу на указанных выше фиксированных

глубинах получают по 9 значений температур грунта, которые и используются для определения составляющих температурного режима вечномерзлых грунтов по каждой скважине (см. § 5).

§ 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ

Температурный режим какой-либо области исследований за тот или иной промежуток времени характеризуется последовательной совокупностью температурных полей в этой области за указанный промежуток времени. Изучая температурный режим, рассматривают эти совокупности полей, выбирая интересующие показатели, т. е. те или иные характеристики температурного режима. Это могут быть максимальные или минимальные отрицательные температуры в определенной зоне области исследований, глубины многолетнего оттаивания или промерзания грунтов, глубины сезонного оттаивания или промерзания и т. д.

В некоторых случаях эти характеристики определяют, непосредственно анализируя полученные тем или иным способом температурные поля, а иногда их целесообразно определять упрощенным путем.

Составляющие температурного режима в принципе характеризуют на каком-либо участке только точку, для которой они были определены. Однако при выборе площадки и при районировании выбранной площадки их обобщают для описания районированных участков. В подобных случаях составляющие температурного режима определяют обычно упрощенным путем, как это будет показано ниже.

Обобщенные характеристики температурного режима грунтов могут отображать лишь какие-то обобщенные условия. Поэтому использование таких характеристик для оценки температурного режима в какой-нибудь области исследований предполагает относительное единообразие температурного режима в этой области. Учитывая, что главенствующую роль в теплообмене с подстилающими грунтами играют условия теплообмена на поверхности грунтов, обобщенные характеристики их температурного режима в некоторой области исследований будут стабильны, если на поверхности грунтов, слагающих эту область, условия теплообмена будут единообразны. Кроме того, известно, что температурный режим зависит от свойств грунтов, однородность которых в некоторой области определит и единообразие температурного режима в этой области. Оба эти условия выполняются на участках, которые характеризуют литолого-генетическим единством грунтов.

Так как, в общем случае, условия теплообмена на поверхности грунтов определяются ландшафтом этой поверхности и однородность ландшафта служит показателем однородности подстилающих грунтов, обобщенные характеристики температурного

режима следует использовать в пределах участков с однородным ландшафтом, границы которых и будут определять границы относительного постоянства обобщенных характеристик. Смена ландшафта, как правило, характеризует изменение температурного режима подстилающих грунтов.

При строительстве и эксплуатации зданий и сооружений в зоне их влияния на грунты начинают действовать, как известно, источники (иногда — стоки) тепла, причем эти воздействия неодинаковы как в пространстве, так и во времени. Незакономерно изменяются в пределах таких участков и условия теплообмена на поверхности грунта. Поэтому температурный режим грунтов на участках строительства и эксплуатации зданий и сооружений будет отличаться крайней пестротой и использование обобщенных его характеристик на таких участках лишено смысла. Достоверно описать температурный режим грунтов на этих участках можно, как правило, только его характеристиками, определенными на основе анализа температурных полей соответствующей области исследований, или температурными полями в целом. Для характеристики же естественного температурного режима вечномерзлых грунтов следует использовать его обобщенные показатели.

По материалам термокаротажных работ в каждой скважине определяют следующие обобщенные характеристики температурного режима грунтов: глубину сезонного оттаивания или промерзания; глубину распространения годовых колебаний температуры в грунтах; среднегодовую температуру грунтов (на глубине годовых нулевых амплитуд).

По этим данным строят так называемые огибающие кривые, показывающие величину максимальных амплитуд температур грунта за год на любой глубине в пределах слоя годовых колебаний температуры.

Различаются глубина сезонного оттаивания (промерзания) на момент исследований, полная глубина и нормативная глубина.

Глубины сезонного оттаивания и промерзания на момент исследований и полные глубины

Глубина сезонного оттаивания грунтов на момент исследований Z_n^T определяется по графику температур как место пересечения температурной кривой с осью нулевой температуры (рис. 4).

Иногда по тем или иным причинам измеренные температуры до глубин 2—3 м могут обладать незакономерными колебаниями, например глубина оттаивания по более ранним замерам окажется больше, чем глубина, определенная позже. В этих случаях целесообразнее всего величину Z_n^T определять по материалам бурения скважин (на дату проходки). После этого находят пол-

ную глубину оттаивания Z_n^T , которая представляет собой максимальную глубину оттаивания грунтов в данной точке в год исследований. В тех случаях, когда бурение скважин или измерение температуры в них производят осенью с началом промерзания грунта, определенная непосредственно глубина сезонного оттаивания и будет полной его глубиной. В остальных случаях величина Z_n^T определяется расчетом и является предсказанной (прогнозной) величиной.

Наиболее удобен и надежен способ определения Z_n^T , предложенный в свое время В. Ф. Тумелем [23] и основанный на пересчете получаемых непосредственно значений Z_n^T . Было подмечено, что в пределах значительных районов, обладающих относительным единством климатических условий, глубины оттаивания или промерзания грунтов, абсолютно меняясь как в пространстве, так и во времени, в один и тот же момент в любых точках этого района будут составлять одинаковые доли от полных глубин оттаивания или промерзания в соответствующих точках. То есть темп оттаивания или промерзания грунтов в одном климатическом районе одинаков для всех точек. Поэтому появилась возможность, зная средний ход промерзания или оттаивания грунтов по району в целом, определять величину Z_n^T в любой точке по измеренной в фиксированный момент времени в этой точке величине Z_n^T .

Величина Z_n^T определяется по формуле

$$Z_n^T = \frac{Z_n^T \cdot 100}{n}, \quad (4)$$

где n — доля оттаивания грунта (в %) от полной ее глубины, полученная по графику хода оттаивания грунта (который получают на ближайшей метеостанции) на момент, соответствующий моменту определения Z_n^T в исследуемой скважине.

Если позволяет время, величину Z_n^T рекомендуется рассчитывать, используя не средний ход оттаивания грунтов, а ход оттаивания в году исследований. Естественно, что такие данные можно получить лишь в осенний период.

С момента начала промерзания слоя сезонного оттаивания и до завершения промерзания этого слоя с некоторым допущением можно считать, что измеренная Z_n^T оттаивания равна Z_n^T

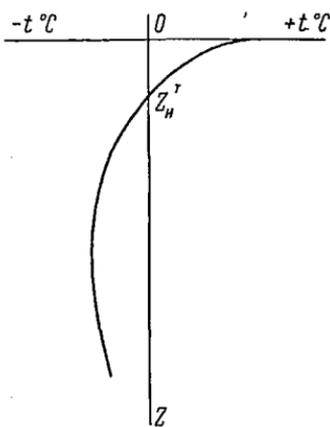


Рис. 4. Определение глубины сезонного оттаивания по температурной кривой

оттаивания. Аналогично и для слоя сезонного промерзания считаем, что с момента начала оттаивания этого слоя и до его полного оттаивания положение подошвы этого слоя соответствует $Z_{\text{п}}^{\text{М}}$ промерзания.

При дальнейшем изложении полную глубину сезонного оттаивания будем обозначать $Z_{\text{п}}^{\text{T}}$, а полную глубину сезонного промерзания соответственно $Z_{\text{п}}^{\text{М}}$.

Нормативные и расчетные глубины сезонного оттаивания и промерзания

Понятие нормативной глубины сезонного оттаивания $H_{\text{T}}^{\text{н}}$ и промерзания $H_{\text{М}}^{\text{н}}$ грунтов введено в практику инженерно-геологических изысканий Строительными нормами и правилами проектирования оснований и фундаментов на вечномерзлых и обычных, талых грунтах (СНиП II-Б.1—62 и СНиП II-Б.6—66). Значения нормативных глубин используются для расчета фундаментов на устойчивость по условиям нормального выпучивания. В общем случае глубина заложения фундаментов должна быть несколько больше значений $H_{\text{T}}^{\text{н}}$ и $H_{\text{М}}^{\text{н}}$.

Эти величины используются также и при расчете фундаментов на воздействие сил касательного пучения. Для каждого конкретного здания или сооружения, помимо этого, вычисляются расчетные глубины оттаивания и промерзания (H_{T} и $H_{\text{М}}$) путем умножения значений нормативных глубин на коэффициенты, характеризующие тепловое влияние данного конкретного здания и сооружения. Коэффициенты эти (m_i) могут быть как меньше, так и больше единицы.

Таким образом, нормативные глубины являются некоторым базовым уровнем оттаивания и промерзания грунтов, складывающимся на территории строительства. Этот уровень уточняется по месту возведения конкретных зданий и сооружений с учетом их непосредственного теплового влияния.

Но при строительстве освоении территории на глубины оттаивания и промерзания влияют не только здания и сооружения. Во многих случаях гораздо более существенное влияние оказывает общий характер изменения условий теплообмена на поверхности грунтов (уничтожение растительности, снежного покрова, мероприятия по осушению, зачернение территории и т. п.). Поэтому нормативные глубины должны определяться с учетом преобразования условий теплообмена на площадке в целом. Кроме того, нормативные глубины должны отражать наиболее благоприятные для оттаивания или промерзания условия, поскольку фундаменты надо рассчитывать на воздействие максимально возможных сил пучения. Можно сказать, что уменьшение нормативной глубины оттаивания или промерзания по сравнению с некоторой объективной ее величиной приведет к недо-

статочной устойчивости фундаментов по условиям выпучивания, а увеличение — к избыточной устойчивости.

Эти обстоятельства и отражены СНиП II-Б.1—62 и СНиП II-Б.6—66, указывающими, что за нормативную глубину оттаивания принимается наибольшая из ежегодных максимальных глубин сезонного оттаивания по данным наблюдений (в течение не менее 10 лет) за фактическим оттаиванием грунтов на осушенной площадке без растительного и торфяного покрова, очищаемой весной от снега. Нормативная глубина промерзания определяется аналогично, но по средним из наибольших глубин на оголенной от растительности и снега площадке.

СНиПы указывают также, что в случае невозможности натурального определения H_T^H или H_M^H последние находят теплотехническим расчетом, а для определения H_M^H , кроме того, рекомендуется пользоваться эмпирической формулой и картой изолиний масштаба порядка 1 : 12 500 000.

Следует особо подчеркнуть, что определение понятия нормативных глубин СНиПы не приводят. Поэтому смысл этого понятия приходится выводить из условий использования нормативных глубин при проектировании и регламентированных методов их определения. В первую очередь, возникает вопрос о степени обобщения этих величин, т. е. о размерах территории, для которой определяется одно их значение. Метод натурального определения той и другой величины ответа на этот вопрос не содержит. Однако для H_M^H , как указывалось, регламентируется определение по эмпирической формуле и по карте изолиний. В этих случаях одно значение H_M^H характеризует территорию площадью в тысячи и десятки тысяч квадратных километров. Поскольку регламентированные методы определения равноправны, то очевидно, что одна величина H_M^H , определенная натурным путем, также должна распространяться на значительную территорию. Следует отметить, что для супесей и песков мелких и пылеватых при определении по формуле и карте величина H_M^H берется с коэффициентом 1,2. Таким образом, все многообразие условий геолого-географической среды теплообмена на громадной территории укладывается в два, а для натурального метода — в одно значение нормативной глубины промерзания грунтов.

Относительно нормативных глубин сезонного оттаивания правомерен аналогичный вывод, поскольку натурные методы определения H_T^H и H_M^H аналогичны, а каких-либо специальных оговорок на этот счет не сделано.

Практика подтверждает, что при проектировании оснований и фундаментов в подавляющем большинстве случаев используется одно значение для H_T^H и два — для H_M^H с учетом упомянувшегося поправочного коэффициента для значительных по площади территорий (Чита, Якутск и т. д.).

Рассмотрим вопрос об обоснованности такого обобщения. Современные представления о теплообмене в промерзающих и оттаивающих грунтах и согласующиеся с ними многочисленные материалы инженерно-геологических работ и исследований указывают на чрезвычайно высокую степень изменчивости геолого-географических условий теплообмена, в частности на изменчивость глубин сезонного оттаивания и промерзания грунтов в пределах даже небольших участков. В естественных условиях на таких участках глубины сезонного оттаивания и промерзания могут отличаться друг от друга иногда в 2—3 раза и даже более. В условиях строительного освоения, которые далеко не всегда соответствуют условиям натурного определения H_T^H и H_M^H на опытных площадках, изменчивость глубин оттаивания и промерзания от точки к точке будет не менее интенсивной, чем в естественных условиях. Поэтому с позиций надежности проектирования фундаментов если и принимается единственная величина H_T^H или H_M^H для какого-либо района, то она должна быть наибольшей из возможных значений глубин оттаивания или промерзания грунтов в этом районе. Правда, при единственном наибольшем значении H_T^H или H_M^H фундаменты некоторой части зданий в районе строительства будут рассчитаны с избыточной устойчивостью, что отразится на стоимости строительства. Использование же другой (не наибольшей) величины H_T^H или H_M^H , в свою очередь, приведет к деформациям какой-то части зданий и сооружений за счет пучения.

Методы определения единственного значения H_T^H или H_M^H должны гарантировать получение именно наибольшей из возможных глубин промерзания или оттаивания грунтов. При натурном методе определения H_T^H и H_M^H в каком-либо районе опытная площадка, следовательно, должна выбираться на грунтах, которые при прочих равных условиях будут характеризоваться наибольшими глубинами оттаивания или промерзания, т. е. район в этих целях должен быть обследован. Подобная оценка района возможна лишь при достаточно детальных исследованиях состава, свойств и температурного режима грунтов, учитывающих к тому же влияние условий теплообмена на поверхности грунтов в естественных условиях, т. к. опытная площадка должна быть оголена.

Не вызывает никаких сомнений, что для выбора опытной площадки инженерно-геологические исследования упомянутого характера нецелесообразны и, как показывает практика, не выполняются. Если натурные наблюдения все же организуются, то они приводят к необоснованному, случайному, по существу, выбору участков для размещения опытных площадок.

Обоснованный выбор опытной площадки на какой-либо территории возможен также при условии, что вся ее площадь пред-

варительно покрыта мерзлотной съемкой. Однако в этом случае материалы мерзлотной съемки сами по себе позволяют дифференцированно оценить всю территорию исследований в отношении максимально возможных глубин оттаивания и промерзания с учетом характера строительного освоения территории. Определять же после этого путем десятилетних наблюдений нормативные глубины вряд ли имеет смысл. Таким образом, следует сделать вывод о том, что натурный метод определения H_T^H и H_M^H в качестве единственного значения для значительного района практически использован быть не может.

Для определения единственного значения H_T^H остается метод теплотехнического расчета. Но и в этом случае, чтобы получить исходные данные для расчета, гарантирующие определение максимально возможной глубины оттаивания, требуется, как и в первом случае, исследование района, для которого это значение определяется.

Альтернативой единственным значениям может служить определение H_T^H или H_M^H для каждой площадки строительства. Однако регламентированный СНиПом натурный метод в данном случае также неприемлем, поскольку за 10 лет перед началом проектно-изыскательских работ площадки строительства в подавляющем большинстве случаев неизвестны. При организации натурных наблюдений одновременно с началом изысканий материалы их смогут быть использованы не ранее чем через 10 лет, что существенно их обесценивает.

Для определения единственного значения H_M^H , как указывалось, регламентируется метод расчета по эмпирической формуле. Автором были сопоставлены результаты, получаемые по этой формуле, с наибольшими за ряд лет глубинами промерзания по площадкам в Сыктывкаре, Братске, Чите и в некоторых других пунктах. Натурные результаты оказались в среднем в 1,5—2 раза больше, чем это определялось при помощи упомянутой формулы. Более того, анализ причин деформаций зданий, выстроенных на талых грунтах, например в Чите, показывает, что практически единственная их причина — выпучивание фундаментов зданий, происходящее из-за применения в расчетах фундаментов значения H_M^H , вычисленного по эмпирической формуле СНиП II-Б.1—62.

Что касается карты изолиний H_M^H , то она дает результаты, совпадающие с результатами расчета по формуле.

Изложенное свидетельствует, во-первых, о том, что единственное гарантированное наибольшее значение H_T^H или H_M^H для какого-либо района определить либо практически невозможно, либо это сопряжено со значительными ошибками и, во-вторых, что методы натурального определения по эмпирической формуле и карте изолиний для целей изысканий (и проектирования)

использованы быть не могут. По-видимому, наиболее целесообразным является определение нормативных глубин для каждой площадки строительства, а в пределах площадки (при изысканиях для технического проекта) — для каждого инженерно-геологического мерзлотного микрорайона. На стадии рабочих чертежей глубины оттаивания и промерзания должны определяться уже для конкретных участков размещения тех или иных зданий и сооружений с учетом характера планировки и благоустройства прилегающих к зданиям или сооружениям площадей.

Следовательно, возникают вопросы о рациональной методике определения глубин H_T^H и H_M^H при изысканиях и, прежде всего, о существовании понятия нормативных глубин и степени возможного их обобщения.

Как это уже отмечалось, обобщение характеристик температурного режима имеет смысл для участков, характеризующихся единством условий теплообмена на их поверхности и геологической однородностью слагающих эти участки грунтов. Такими участками являются микрорайоны площадки, выделяемые при изысканиях для технического проекта. На этом этапе изысканий еще неизвестны технические решения оснований и фундаментов и характер преобразований условий теплообмена на поверхности грунтов. Поэтому в данном случае целесообразно определять нормативные глубины в наиболее благоприятствующих оттаиванию или промерзанию грунтов условиях для каждого микрорайона, т. е. без учета влияния каких-либо покровов на поверхности грунта. Кроме того, за нормативные глубины в каком-либо микрорайоне следует принимать максимальные глубины промерзания или оттаивания в его пределах в этих наиболее благоприятных условиях (следует заметить, однако, что ландшафтная однородность микрорайонов не дает оснований ожидать сколько-нибудь существенных перепадов в глубинах оттаивания или промерзания по их площади).

Исходя из сказанного, можно предложить следующее определение понятия нормативной глубины сезонного оттаивания и промерзания грунтов. За нормативную глубину сезонного оттаивания (промерзания) грунтов в пределах какого-либо участка следует принимать наибольшую возможную глубину оттаивания (промерзания) грунтов на этом участке при удалении на нем всех видов растительности (и снежного покрова). Участки, в пределах которых определяется одно значение нормативной глубины, должны характеризоваться единообразием инженерно-геологических мерзлотных условий (условий теплообмена на поверхности грунтов, геологического строения, состава, свойств и состояния грунтов).

При изысканиях для рабочих чертежей допустимая степень обобщения каких-либо характеристик температурного режима и нормативных глубин, в частности, по-види-

тому, весьма невелика. На этом этапе изысканий ИГМ условия определяются на участках конкретных зданий и сооружений и с учетом технического проекта их оснований и фундаментов. Глубины оттаивания и промерзания грунтов, принимаемые в расчет при рабочем проектировании, должны непосредственно отражать тепловое влияние зданий и сооружений и вообще изменение всех условий теплообмена на поверхности грунтов, связанного с освоением данного конкретного участка. Здесь следует определять расчетные глубины сезонного оттаивания и промерзания грунтов. Каждое значение такой глубины может характеризовать лишь ту точку, в которой оно определено. Поэтому под расчетной глубиной сезонного оттаивания (промерзания) грунтов в какой-либо точке следует понимать наибольшую возможную глубину сезонного оттаивания (промерзания) грунтов в этой точке, определенную в таких условиях оттаивания (промерзания) грунтов, которые будут соответствовать аналогичным условиям в период строительства и эксплуатации проектируемых зданий и сооружений.

Нормативные глубины, следовательно, определяются только при изысканиях для технического проекта, а расчетные — при изысканиях для рабочих чертежей. Методы определения нормативных глубин сезонного оттаивания и промерзания рассматриваются ниже.

Нормативная глубина сезонного оттаивания или промерзания является, по существу, полной глубиной оттаивания или промерзания, но для такого года, в котором сезонное оттаивание или промерзание грунта будет максимально возможным (без учета влияния покровов).

Если рассмотреть любую приближенную аналитическую формулу для определения глубины сезонного оттаивания или промерзания грунтов от наиболее простых до наиболее усложненных, то окажется, что эта глубина пропорциональна произведению $t_{ср. в} \tau_{п}$, где $t_{ср. в}$ есть средняя температура воздуха (или поверхности грунта) за время от начала оттаивания или промерзания, а $\tau_{п}$ — время оттаивания или промерзания [18].

Возьмем, например, для простоты широко известную формулу Стефана:

$$Z_{п}^{T(M)} = \sqrt{\frac{2\lambda_{т(M)} t_{ср. в} \cdot \tau_{п}}{Q_{с. т}}}, \quad (5)$$

где $Z_{п}^{T(M)}$ — глубина оттаивания или промерзания за время $\tau_{п}$; $\lambda_{т(M)}$ — коэффициент теплопроводности талого (при оттаивании) или мерзлого (при промерзании) грунта;

$Q_{с. т}$ — количество скрытых теплот в грунте, поглощаемых льдом при его оттаивании или отдаваемых водой при ее замерзании.

В одной и той же точке, но за различное время $\tau_{п_1}$ и $\tau_{п_2}$ глубины $Z_{п_1}^{T(M)}$ и $Z_{п_2}^{T(M)}$ будут относиться друг к другу следую-

шим образом:

$$\frac{Z_{n_1}^{\tau(M)}}{Z_{n_2}^{\tau(M)}} = \sqrt{\frac{(2\lambda_{\tau(M)} t_{\text{ср. в}_1} \cdot \tau_{n_1}) / Q_{\text{с. т}}}{(2\lambda_{\tau(M)} t_{\text{ср. в}_2} \cdot \tau_{n_2}) / Q_{\text{с. т}}}}$$

или

$$\frac{Z_{n_1}^{\tau(M)}}{Z_{n_2}^{\tau(M)}} = \sqrt{\frac{t_{\text{ср. в}_1} \cdot \tau_{n_1}}{t_{\text{ср. в}_2} \cdot \tau_{n_2}}} \quad (6)$$

Отсюда следует, что

$$Z_{n_2}^{\tau(M)} = Z_{n_1}^{\tau(M)} \sqrt{\frac{t_{\text{ср. в}_2} \cdot \tau_{n_2}}{t_{\text{ср. в}_1} \cdot \tau_{n_1}}} \quad (7)$$

Если при изысканиях мы определим полную глубину оттаивания или промерзания $Z_{n_1}^{\tau(M)}$ в какой-либо точке за год исследований, то нетрудно будет определить максимально возможную полную глубину оттаивания или промерзания $Z_{n, \text{max}}^{\tau(M)}$ в этой же точке, приняв в расчет произведение $t_{\text{ср. в, max}} \tau_{n, \text{max}}$, наибольшее по району работ за все время наблюдения местной метеостанции.

Отсюда максимально возможная полная глубина сезонного оттаивания или промерзания будет равна:

$$Z_{n, \text{max}}^{\tau(M)} = Z_{n_1}^{\tau(M)} \frac{t_{\text{ср. в, max}} \cdot \tau_{n, \text{max}}}{t_{\text{ср. в}_1} \cdot \tau_{n_1}}, \quad (8)$$

где для глубины оттаивания $Z_{n, \text{max}}^{\tau(M)}$ произведение $t_{\text{ср. в, max}} \tau_{n, \text{max}}$ является максимально возможным произведением суммы положительных среднедекадных температур на продолжительность каждой декады, обычно в часах, т. е. на 240 ч, а для глубины промерзания $Z_{n, \text{max}}^{\tau(M)}$ — таким же произведением суммы среднедекадных отрицательных температур на продолжительность каждой декады, т. е. на 240 ч.

Эти произведения подсчитываются для реальных самого теплого лета или самой холодной зимы, определяемых по климатическому справочнику для данного района. Самым теплым летом или самой холодной зимой будут те, в которых произведение соответственно среднелетней температуры на продолжительность теплого периода или среднезимней температуры на продолжительность холодного периода будет наибольшим.

Посмотрим теперь, насколько максимально возможная полная глубина сезонного оттаивания или промерзания будет соответствовать нормативной глубине.

Нормативные глубины определяются для случаев, отвечающих условиям, складывающимся на площадке при эксплуатации проектируемых зданий и сооружений (вне зон непосредственного теплового влияния зданий). В смысле влияния на глубину оттаивания эти условия заключаются в том, что участки возле зданий в предельном случае полностью оголяются от растительного и снежного покровов, причем для глубины оттаивания имеет значение удаление растительного покрова, для глубины

промерзания — обоих. Понятно, что на оголенных площадках оттаивание и промерзание будут больше, чем в естественных условиях. Например, на площадках, покрытых травяным покровом или мхами-лишайниками, и на аналогичных, но оголенных от растительности участках, полные глубины оттаивания отличаются не более чем на 10—20%, т. е. для таких участков в подавляющем большинстве случаев можно с приближением считать, что

$$H_T^H = 1,2Z_{п, \max}^T \quad (9)$$

Аналогичное правило справедливо в отношении глубин промерзания для районов с малоснежными зимами

$$H_M^H = 1,2Z_{п, \max}^M \quad (10)$$

Достаточно точно исключать влияние растительности и снега можно следующим образом: для 3—4 точек на площадке, характеризующихся наиболее интенсивным растительным или снежным покровом, H_T^H и H_M^H определяются любым расчетным способом (по В. А. Кудрявцеву, В. С. Лукьянову или по формулам приложения к СНиП II-Б.6—66), причем в расчет принимается максимально возможная величина произведения $t_{ср. в, \max} t_{п, \max}$. Для этих же точек указанным выше путем определяют $Z_{п, \max}^{(M)}$. Затем определяется коэффициент пропорциональности между ними

$$K_1 = \frac{H_T^H}{Z_{п, \max}^{(M)}} \quad (11)$$

Для всех остальных точек нормативные глубины рассчитываются путем умножения значений максимально возможных полных глубин на наибольшее из рассчитанных значений этого коэффициента.

В тех случаях, когда во время изысканий слой сезонного оттаивания полностью промерз или еще не началось промерзание грунта, нормативные глубины во всех необходимых точках приходится определять расчетным способом.

Если на площадке изысканий имеются участки, естественным образом оголенные от растительного покрова или обладающие редким и маломощным покровом, то величину $Z_{п, \max}^T$, рассчитанную по точкам на таких участках, можно принять за H_T^H для этих точек. Здесь коэффициент пропорциональности будет рассчитываться по $Z_{п, \max}^T$ и по $Z_{п, \max}^T$, т. к. $H_T^H = Z_{п, \max}^T$:

$$K_2 = \frac{Z_{п, \max}^T}{Z_{п, \max}^T} \quad (12)$$

Для остальных точек площадки уже нет необходимости рассчитывать $Z_{п, \max}^T$, поскольку величина H_T^H для них определится умножением $Z_{п, \max}^T$ на коэффициент K_2 .

Аналогичный прием можно применить для получения коэффициента K_1 , рассчитав его по данным наблюдений за промерзанием и оттаиванием грунтов на площадках метеостанций, если на них нет растительности (или есть, но редкая и маломощная) и расчищается снег. Если есть данные таких наблюдений за оголенными площадками метеостанций не менее чем за 10 лет, то наибольшие из наблюдаемых глубин оттаивания или промерзания, согласно СНиП II-Б.1—62 и СНиП II-Б.6—66, можно принять за нормативные именно для этих площадок. Эти глубины должны в общем случае быть несколько меньше значений $H_{T(M)}^H$, полученных пересчетом, т. к. маловероятно, что именно за 10 лет наблюдений отмечались наибольшие произведения $t_{\text{ср. в.}} \cdot \tau_{\text{п. max}}$.

Ни в коем случае не следует использовать данные, полученные на таких площадках, непосредственно в качестве $H_{T(M)}^H$ для какого-либо района. Они могут применяться лишь для пересчета полученных непосредственно значений $Z_{\text{п}}^T(M)$.

Коэффициенты K_1 и K_2 должны быть всегда больше единицы, а для одной и той же точки $K_2 > K_1$. Коэффициент K_2 в принципе должен быть очень точен, поскольку выражает соотношение глубин на оголенной площадке, т. е. там, где воздействие фактора $t_{\text{ср. в.}} \cdot \tau_{\text{п}}$ не ослабляется в натуре влиянием растительности или снега. Коэффициент же K_1 для большинства точек площадки, не обладающих такими интенсивными растительностью или снежным покровом, как те точки, где он определялся, будет несколько завышен.

Значение предложенного метода пересчета глубин оттаивания и промерзания, определенных в процессе изысканий, на полные, максимальные и нормативные заключается в том, что он позволяет в большинстве случаев изысканий сравнительно просто и в массовом порядке определять величины $H_{T(M)}^H$, что, в свою очередь, позволит более надежно и экономично рассчитывать фундаменты зданий и сооружений.

Указанный метод не может быть использован для сильнольдистых, особенно торфяных грунтов, перекрытых мощным сплошным моховым покровом. В этих случаях снятие мохового покрова очень часто приводит к многолетнему оттаиванию грунтов и термокарстовому процессу. Часто образуется несливающаяся мерзлота. Здесь в большинстве случаев, даже если положение подошвы слоя оттаивания стабилизируется, нельзя говорить о сезонном оттаивании грунтов. Следует определять нормативную глубину промерзания. Однако такие грунты обычно используются при строительстве с сохранением их мерзлого состояния, с тщательным сохранением растительного покрова и расчисткой снега. Поэтому из смысла формулировки величины $H_{T(M)}^H$ следует, что в данном случае она должна определяться при условии сохранения растительного покрова, что будет отвечать

характеру строительства и эксплуатации проектируемых зданий и сооружений:

$$H_T^H = Z_{п, \max}^T \quad (13)$$

Нормативные глубины для условий оголенных площадок, как правило, будут больше, чем расчетные глубины, определенные с учетом застройки.

Среднегодовая температура грунтов и глубина распространения годовых колебаний температуры

Помимо определения глубин сезонного оттаивания и промерзания по результатам термокаротажных работ, как это отмечалось, определяются такие характеристики температурного режима грунтов, как их среднегодовые температуры $t_{с. год}$ и глубины распространения годовых колебаний температуры в них $Z_{год}$. Величины $t_{с. год}$ и $Z_{год}$ функционально связаны друг с другом и определяются совместно.

Поскольку то или иное количество поступающей в грунт (или уходящей из него) тепловой энергии определяется условиями теплообмена на поверхности, а распределение этой энергии в грунте (в данном случае в слое годовых колебаний температуры) зависит от состава и свойств грунта, то одни и те же значения $t_{с. год}$ и $Z_{год}$ относятся к участкам, в пределах которых условия теплообмена на поверхности одинаковы и одинаковы также грунты. Однородность грунтов должна соблюдаться либо в пределах всего слоя годовых колебаний температуры, либо в пределах прослоев, границы которых параллельны поверхности грунта, слагающего этот слой.

Следует признать, что участки даже с самыми однородными условиями на поверхности и грунтами всегда будут обладать той или иной изменчивостью, и поэтому, строго говоря, значения $t_{с. год}$ и $Z_{год}$, определенные по какой-либо скважине, будут характеризовать в известной мере случайные условия. Вполне объективно охарактеризовать какую-либо территорию можно лишь тогда, когда значения $t_{с. год}$ и $Z_{год}$ определяются в достаточно большом числе точек, т. е., например, по каждой скважине.

В результате термокаротажа строят температурные кривые. При наличии годового цикла наблюдений за температурой грунтов эти величины определяются по графику температур так, как это показано на рис. 5.

Однако при изысканиях, как правило, не представляется возможности проводить годовые наблюдения, и поэтому приходится ограничиваться, как отмечалось, тремя циклами наблюдений, проводимых за время от 16 до 38 дней. Для расчета $t_{с. год}$ и $Z_{год}$ в данном случае используется иная методика.

В. А. Кудрявцевым [9] была предложена методика, основанная на использовании первого закона Фурье, устанавливающего, что при периодических колебаниях температуры на поверхности

грунта в течение длительного промежутка времени в грунте также устанавливаются колебания температуры с тем же периодом, что и на поверхности, но амплитуды колебаний при этом убывают с глубиной по экспоненте:

$$A_z = A_0 e^{-z \sqrt{\frac{\pi C_{об}}{\lambda T}}}, \quad (14)$$

где A_z — амплитуда температур на глубине Z ;
 A_0 — амплитуда температур на поверхности грунта;
 λ — коэффициент теплопроводности грунта;
 $C_{об}$ — объемная теплоемкость грунта;
 T — период колебания (1 год).

$$A_z = A_0 e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{KT}}}, \quad (15)$$

где K — коэффициент температуропроводности грунта.

Слой, в пределах которого соблюдается указанная зависимость, должен быть однороден (K не должно изменяться), т. е. прежде всего должен быть либо талым, либо мерзлым полностью. В вечномерзлых грунтах, где имеется слой сезонного оттаивания, эту зависимость можно использовать, начиная от кровли вечномерзлых грунтов, но необходимо знать амплитуду колебаний температур на этой кровле. Оказывается (см. рис. 5), на этом уровне амплитуда численно равна среднегодовой температуре грунта $A_{z_n} = t_{с. год}$.

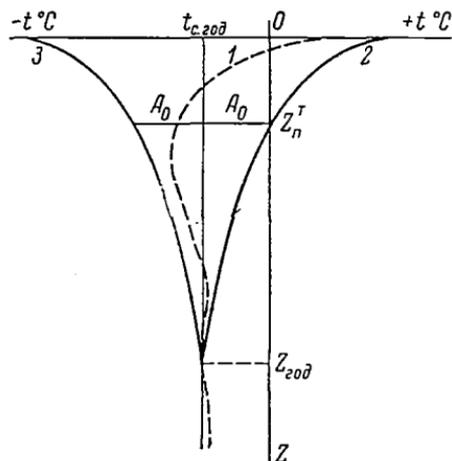


Рис. 5. К определению величин $t_{с. год}$ и $Z_{год}$

1 — распределение температуры грунта по глубине скважины, полученное при термомаркажных работах; 2 — огибающая кривая максимальных отрицательных температур грунта; 3 — огибающая кривая минимальных отрицательных температур грунта

где z — расстояние между подошвой слоя сезонного оттаивания и подошвой слоя годовых колебаний температуры ($z = Z_{год} - Z_n$):

Далее:

$$\ln t_{с. год} = z \sqrt{\frac{\pi}{KT}} - 2,3. \quad (17)$$

На подошве слоя годовых колебаний температуры амплитуда, в свою очередь, будет равна нулю или, учитывая обычную точность измерения, $0,1^\circ \text{C}$ ($A_{z_{год}} = 0,1$).

Отсюда следует, что

$$0,1 = t_{с. год} e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{KT}}}, \quad (16)$$

Значение K определяется непосредственно или с помощью табличных данных, например данных табл. 10 СНиП II-Б.6—66:

$$K = \frac{\lambda_M}{C_{00}^M}, \quad (18)$$

где λ_M — коэффициент теплопроводности мерзлого грунта;

C_{00}^M — объемная теплоемкость мерзлого грунта.

При сложном разрезе K следует определять как средневзвешенную величину, т. е.

$$K_{\text{ср}} = \frac{K_1 m_1 + K_2 m_2 + \dots + K_n m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}, \quad (19)$$

где K_1, K_2, \dots, K_n — коэффициенты температуропроводности;

m_1, m_2, \dots, m_n — мощности соответствующих слоев.

Температурные кривые, полученные при термокаротаже, начиная с некоторой глубины, зависящей от времени, в течение которого проводились наблюдения, должны слиться (они могут не совпадать на величину точности измерения). Чем меньшее время проводились наблюдения, тем на меньшей от поверхности глубине сольются кривые. На слившейся ветви кривой поочередно берутся значения глубин (при этом из них вычитается величина $Z_{\text{п}}$) и температур на этих глубинах и подставляются в уравнение (17) соответственно вместо z и $t_{\text{с.год}}$. Пара значений глубины (без $Z_{\text{п}}$) и температуры, при которых правая часть уравнения совпадает с левой, будет считаться искомой. Не следует только забывать, что для вычисления $Z_{\text{год}}$ к полученной глубине следует прибавить значение $Z_{\text{п}}$.

По полученным значениям $Z_{\text{год}}$ и $t_{\text{с.год}}$ строятся так называемые огибающие кривые, которые ограничивают область изменения отрицательных температур грунта, происходящего в течение года в пределах слоя годовых колебаний температуры.

Следует отметить, что значения $t_{\text{с.год}}$ и $Z_{\text{год}}$ определяются в основном при изысканиях для технического проекта. При изысканиях для рабочих чертежей полная картина температурного режима грунтов за интересующий промежуток времени на участках проектируемых зданий и сооружений получается в результате прогнозирования этого режима.

Для талых грунтов $t_{\text{с.год}}$ и $Z_{\text{год}}$ обычно не подсчитывают, хотя для этого требуется лишь замена значений соответствующих параметров мерзлых грунтов на талые в приведенных зависимостях.

§ 6. ОПЫТНЫЕ ПОЛЕВЫЕ РАБОТЫ

Опытные полевые работы проводятся при изысканиях только для рабочих чертежей и в общем случае включают в себя:

а) испытания висячих свай в пластичномерзлых грунтах статическими нагрузками;

б) испытания висячих свай в твердомерзлых грунтах статическими нагрузками;

в) испытания пластичномерзлых грунтов статическими нагрузками штампами;

г) испытания мерзлых грунтов статическими нагрузками горячими штампами.

Висячие сваи в пластично- и твердомерзлых грунтах испытывают с помощью того же оборудования, которое используется для этого в обычных, талых грунтах. Ведут испытания до того момента, когда наступит условная стабилизация осадки свай.

Различия же между испытаниями в талых и вечномерзлых грунтах заключаются в том, что перед испытанием в вечномерзлых грунтах свая должна быть заморожена в эти грунты, и погружение этой опытной (пробной) сваи перед вмораживанием должно производиться тем же способом, которым технический проект предусматривает погружение в вечномерзлые грунты производственных (рабочих) свай. Кроме того, опытная свая, погруженная в вечномерзлые грунты, не должна ощущать воздействия нейтрализующих сил пучения, направленных противоположно действующей на сваю нагрузке; поэтому в пределах полной или даже нормативной глубины слоя сезонного оттаивания или сезонного промерзания свая должна быть тщательно изолирована от промерзающего грунта.

Испытания сваи в вечномерзлых грунтах ведут в наилучших для работы сваи условиях, т. е. при максимальных отрицательных температурах грунта. Но, как известно, максимальные температуры на разных глубинах в грунте отмечаются в разное время. Поэтому бывает трудно выбрать время испытаний и интерпретировать их результаты. Вот почему при испытаниях необходимо прежде всего обеспечить эффективный контроль за температурой грунтов в зоне заделки сваи. Температуры измеряют в скважине, которую проходят непосредственно у опытной сваи (не дальше 1,0—1,5 м) перед ее установкой. Глубина скважины должна быть на 3—5 м больше глубины заложения сваи, но не менее глубины распространения годовых колебаний температуры. Термокартаж в этой скважине проводят с тем, чтобы получить характеристики естественного температурного режима до установки сваи, после установки в течение времени ее вмораживания и при испытании сваи. В процессе вмораживания периодичность измерения температуры может быть самой различной, но должна обеспечить уверенное суждение о том, что перед началом испытаний тепловое влияние погружения сваи на грунт закончилось. В данном случае в конце периода вмораживания может быть применено правило, с помощью которого определяется выстойка скважин.

Как отмечалось в гл. I, вечномерзлые грунты отличаются реологическими свойствами, проявляющимися в том, что наблю-

дается снижение, и достаточно большое, их прочности под воздействием постоянно приложенной нагрузки. Это вызывает затруднения при производстве испытаний, заключающиеся в том, что приходится искать другие, чем в случае талых грунтов, скорость осадки сваи, при которой осадка считается стабилизированной, и минимальное время, в течение которого должна наблюдаться эта скорость. Не случайно эти испытания являются достаточно длительными и сложными.

Методика испытания свай в вечномерзлых грунтах изложена в работе В. Н. Ерошенко «Свайные фундаменты в пластично-мерзлых грунтах» (Л., Стройиздат, 1972). Поэтому мы не будем подробно останавливаться на всех вопросах методики испытаний, отметим лишь наиболее существенные из них с необходимыми уточнениями.

Изоляция верхней части сваи, находящейся в пределах полной глубины слоя сезонного оттаивания или промерзания, является первостепенно важным делом, поскольку при контакте сваи с промерзающим грунтом выпучивание ослабит силы смерзания и, кроме того, появится фиктивное приращение к реальной несущей способности сваи, которое может быть и абсолютно и относительно очень большим.

Практически целесообразнее всего поступать следующим образом: на полную глубину слоя сезонного оттаивания или промерзания проходится скважина, диаметр которой должен в 2—3 раза превышать поперечник сваи. Если наличные силы не позволяют бурить скважину такого диаметра, то проходят несколько касающихся друг друга скважин так, чтобы они вместе образовали полость в грунте требуемых размеров.

После проходки эту полость зачищают и соосно с ее центром устанавливают сваю. В полость помещают деревянный или металлический короб без дна. После установки сваи пространство между коробом и свайей закладывают уплотненным сухим теплоизолятором (торфом, мхом, опилками и т. п.).

В. Н. Ерошенко предлагает испытывать сваи в любое время года и приводить затем результаты испытаний к расчетному максимальному температурному режиму, имея в виду определение максимальных температур на разных глубинах с помощью формулы (10) СНиП II-Б.6—66. В принципе такое решение вопроса представляется вполне допустимым, но при расчетах по этой формуле в качестве t_0 следует использовать величину $t_{с. год}$, рассчитанную по правилам, изложенным в § 5 настоящей главы.

Дело в том, что в СНиПе глубина распространения годовых колебаний температуры считается постоянной и равной 10 м. Стало быть, на любой температурной кривой температура на этой глубине должна соответствовать $t_{с. год}$. Однако это не так, и способ, рекомендуемый СНиП II-Б.6—66, приводит к ошибкам, иногда значительным. Поэтому расчетные максимальные температуры лучше определять по огибающим кривым. Для этого

значения максимальных отрицательных температур пересчитываются по формуле

$$t_{\max h}^{\text{зд}} = K_t t_{\max h}^{\text{е}}, \quad (20)$$

где $t_{\max h}^{\text{зд}}$ — максимальная отрицательная температура грунта, рассчитанная с учетом отепляющего влияния здания или сооружения, для глубины h ;

K_t — коэффициент теплового влияния здания или сооружения, принимаемый в соответствии с изложенным в п. 5.8 СНиП II-Б.6—66;

$t_{\max h}^{\text{е}}$ — естественная максимальная отрицательная температура грунта на глубине h , определяемая по огибающим кривым.

Когда $h > Z_{\text{год}}$ в качестве $t_{\max h}^{\text{е}}$ берется температура, снимаемая с графиков температурных измерений на глубине, соответствующей значению h .

Во всех еще редких случаях испытаний свай в вечномерзлых грунтах необходимо с целью дальнейшего обобщения материалов определять значения удельного сопротивления свай в зоне ее заложения для различных грунтовых разностей. Для каждой такой разности при ее мощности, равной h , надо учитывать средние значения $t_{\max h}^{\text{е}}$, которые определяются в соответствующих пропорциях, устанавливаемых на основе данных табл. 5 СНиП II-Б.6—66.

Чтобы получить данные о реологических свойствах грунтов, ведется наблюдение за затуханием или условной стабилизацией осадки свай. В. Н. Ерошенко считает, что каждая ступень нагрузки должна выдерживаться по крайней мере до условной (частичной) стабилизации осадок, но не менее 1 суток. По его мнению осадка считается стабилизированной, если она не превышает 0,2 мм за последние сутки наблюдений. Величина ступеней нагрузок в среднем составляет 0,25 от предварительно вычисленной ориентировочной несущей способности свай.

За величину несущей способности свай принимают такую максимальную величину нагрузки на сваю (нормативное сопротивление свай статической нагрузке), при которой не возникает незатухающих деформаций с учетом понижающих коэффициентов однородности грунта и условий его работы:

$$F^{\text{е}} = K_0 m P^{\text{н}}, \quad (21)$$

где $F^{\text{е}}$ — несущая способность свай при естественном температурном режиме грунта во время ее определения;

$P^{\text{н}}$ — нормативное сопротивление свай статической нагрузке;

K_0 — коэффициент однородности грунта, принимаемый равным 0,8;

m — коэффициент условий работы грунта в качестве основания, принимаемый в данном случае равным 1.

Для получения несущей способности сваи, отвечающей максимальному расчетному температурному режиму грунта, следует использовать зависимость, предложенную В. Н. Ерошенко:

$$\Phi^{\max} = m_t \Phi^e, \quad (22)$$

где

$$m_t = \frac{\Phi_1}{\Phi_2}. \quad (23)$$

Здесь Φ_1 — несущая способность сваи, определенная расчетным путем в соответствии с формулой (9) и табл. 5 и 6 СНиП II-Б.6—66 для расчетных максимальных температур грунта, т. е. для $t_{\max}^{\text{зд}}$, но не для t_{\max} по формуле (10) СНиП;

Φ_2 — несущая способность сваи, определенная тем же путем, что и Φ_1 , но при температурах грунта (средних для каждой грунтовой разности), наблюдавшихся при испытаниях.

Осадки для соответствующих нагрузок вычисляются также пропорционально этому коэффициенту.

Испытания грунтов статическими нагрузками — штампами выполняются с целью определения сжимаемости грунтов. При таких испытаниях напряженная зона в грунтах крайне невелика по размерам и ее практически характеризуют единственным значением температуры. Испытания штампами пластичномерзлых грунтов проводятся только в шурфах, причем площадь штампа должна быть не менее 5000 см^2 . Испытания в скважинах не практикуются в связи с крайней затруднительностью температурного контроля грунтов за забоем скважины, практической невозможностью соответствующей подготовки поверхности забоя, а также весьма малой площадью штампа. Применение же штампов площадью не менее 5000 см^2 обусловлено именно трудностью подготовки ровной поверхности даже в шурфе, причем песчаная подсыпка в данном случае далеко не так эффективна, как при испытаниях талых грунтов.

Оборудование для производства штамповых испытаний и сам ход испытаний аналогичны применяемым на талых грунтах. В методике же испытаний есть некоторые различия [34]. Так, испытания вечномерзлых грунтов ведутся только в сухих шурфах, поскольку увлажненные грунты будут во время испытаний оттаивать, что существенно исказит результаты. Нагрузки накладываются ступенями через $0,5 \text{ кг/см}^2$ от начальной нагрузки, соответствующей бытовому давлению на уровне подошвы штампа, до конечной нагрузки, отвечающей максимальной расчетной нагрузке или нагрузке, при которой начинаются незатаухающие осадки испытываемых грунтов. Каждая ступень нагрузки выдерживается до наступления условной стабилизации осадки. Осадка считается условно стабилизированной, если ее приращение становится меньше 1% всей осадки от данной нагрузки за равное

время. В случае же, когда условная стабилизация осадки не наступает в течение 6 суток с момента приложения данной нагрузки, то считается, что наступила незатухающая деформация, и испытания прекращаются.

Перед испытанием измеряется температура в приповерхностной зоне грунта, после испытания желательнее измерить ее и глубже (до 0,4—0,6 м).

Достаточно сложным является вопрос выбора времени для производства испытания. Поскольку оно ведется для условий, характеризующих наименьшую прочность грунта, то температура грунта должна быть максимально возможной (равной величине $t_{\max h}^{\text{эл}}$ на глубине h проведения испытания). Более или менее близкие к ней температуры (близкие также к 0°C) могут быть зафиксированы на забое шурфа, пройденного за некоторое время до наступления устойчивых отрицательных температур воздуха. В этом случае в момент окончания проходки шурфа температура грунта у его забоя практически будет соответствовать $t_{\max h}^{\text{е}}$ (правда, только в тех случаях, когда h не будет отличаться более чем на 1,0—1,5 м от полной глубины оттаивания грунтов).

За время подготовки к испытаниям (в осенний период), учитывая, что температура воздуха остается в среднем положительной, следует ожидать некоторого повышения температуры грунта до значений, в той или иной степени приближающихся к $t_{\max h}^{\text{зд}}$. Таким образом, штамповые испытания пластичномерзлых грунтов целесообразнее всего проводить осенью. Но в этих случаях можно получить более или менее удовлетворительную температуру грунтов только при условии $h + (1,0 \div 1,5 \text{ м})$, т. е. величина h примерно должна соответствовать глубине заложения фундаментов.

Можно идти и несколько иным путем. Например, проходить шурфы до соответствующих глубин весной или летом и ждать повышения температуры в призабойной части шурфа. Однако проконтролировать ход температурных изменений достаточно эффективным образом будет трудно. Кроме того, в весенне-летний период градиенты температур грунтов в забое шурфа будут значительно больше, чем осенью, в результате чего в пластичномерзлом, т. е. сжимаемом, состоянии может находиться лишь очень незначительная часть грунта, размеры которой будут гораздо меньше, чем действительные размеры сжимаемой зоны в пластичномерзлых грунтах под воздействием данной нагрузки.

Аналогичные замечания будут справедливы и для осеннего времени штамповых испытаний на глубинах, отличающихся от глубин заложения фундаментов. Поэтому наиболее достоверные результаты испытаний можно получить лишь в осенний период и на глубинах, отвечающих глубинам заложения фундаментов. Практически мы не можем ожидать получения достаточно до-

стоверных материалов при испытаниях на различных глубинах в пределах активной зоны воздействия проектируемых зданий и сооружений. Следовательно, ценность полевых испытаний пластичномерзлых грунтов штампами вообще невелика.

Испытания грунтов горячими штампами для определения их сжимаемости при оттаивании под нагрузкой, напротив, не сопряжены с какими-либо методическими затруднениями. Целью испытаний является определение коэффициентов оттаивания A и уплотнения a грунтов при их оттаивании и последующем уплотнении под нагрузкой. Коэффициент оттаивания находят при оттаивании практически ненагруженного грунта (нагрузка от собственного веса — не более $0,1 \text{ кг/см}^2$). Коэффициент уплотнения устанавливают в интервале от нагрузки на грунты, соответствующей бытовому давлению на глубине проведения испытания, до нагрузки на глубине испытаний, соответствующей расчетной. Испытаниям подвергают грунты каждого слоя, встречающегося в пределах прогнозируемой чаши оттаивания под проектируемым зданием или сооружением.

Как и при испытаниях пластичномерзлых грунтов, испытания горячими штампами проводят только в сухих шурфах. Площадь штампа должна быть не менее 5000 см^2 . Его конструкция призвана обеспечивать температуру подошвы штампа постоянно положительной (электрообогрев, горячая вода, горячее минеральное масло и т. п.), но при условии, что эта температура (в обычных случаях) не должна превышать 100° С . Остальное оборудование — как и при испытаниях штампами талых грунтов.

Оттаивание грунта, как отмечалось, проводится разгруженным обогреваемым штампом до глубины порядка $0,5 \text{ м}$ [34], после чего поочередно ступенями прикладываются уплотняющие нагрузки, а дальнейшее поступление тепла в штамп прекращается.

Перед уплотнением оттаявшего грунта и после окончания уплотнения под центром штампа ведут дистанционное измерение глубины оттаивания грунта. Для этого предварительно в грунты закладывают температурные датчики.

Уплотнение грунта на каждой ступени нагрузки ведется, как обычно, до наступления условной стабилизации осадки, т. е. до тех пор, пока ее величина за 1 час наблюдений не будет превышать $0,1 \text{ мм}$ для песчаных грунтов и $0,05 \text{ мм}$ — для глинистых.

Методика обработки результатов испытаний как пластичномерзлых, так и оттаивающих грунтов достаточно подробно изложена в соответствующих руководствах [34] и поэтому здесь не приводится.

§ 7. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

Методика различных видов геофизических работ, выполняемых в районах распространения вечномерзлых грунтов, по существу не отличается от методики аналогичных видов работ

при производстве изысканий на талых грунтах. Различна лишь интерпретация материалов исследований, которая обусловлена существенной разницей в свойствах талых и мерзлых грунтов.

Опыту применения тех или иных видов геофизических работ на вечномерзлых грунтах посвящено к настоящему времени достаточно много печатных работ [1, 2, 10, 22, 36, 44]. Поэтому мы не будем останавливаться на общезвестных методических вопросах и частных вопросах интерпретации полевых материалов, а уделим основное внимание задачам и условиям применения геофизических работ.

Из различных видов геофизических работ наибольшее распространение получили электроразведка постоянным током, малоглубинная сейсморазведка и проводимые гораздо реже, чем следовало бы, скважинные исследования. Остальные виды геофизических работ применяются пока в экспериментальном порядке, и результаты этих экспериментов, по крайней мере в настоящее время, не дают основания оценить возможности их практического использования при изысканиях.

Электроразведка постоянным током осуществляется по схемам вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и электрического профилирования (ЭП). При вертикальном электрическом зондировании наиболее часто применяется обычный метод, при котором питающие и измерительные электроды находятся в одной плоскости. Реже применяются крестовое или, особенно, круговое электрическое зондирование, которые отличаются повышенной трудоемкостью выполнения. В последнее время все шире применяется ВЭЗ по методу двух составляющих, трудоемкость которого практически немногим отличается от трудоемкости обычного зондирования.

При помощи ВЭЗ определяются вертикальное строение и мощность вечномерзлых грунтов; литологические особенности грунтов; положение в разрезе наиболее льдонасыщенных зон.

Самостоятельное применение вертикального электрического зондирования без сопоставления геоэлектрических разрезов с материалами бурения инженерно-геологических скважин и термокаротажных работ в подавляющем большинстве случаев не дает положительных результатов. Поэтому интерпретация результатов ВЭЗ должна проводиться лишь на основе интерпретации опорных геоэлектрических разрезов, получаемых при постановке ВЭЗ у скважин. Наилучшие же результаты при интерпретации данных ВЭЗ достигаются в тех случаях, когда оно ведется с использованием параметрических значений удельного электрического сопротивления ($UЭС$), полученных при каротажных работах у опорной скважине.

Вертикальное электрическое зондирование выполняется с разносами между питающими электродами, в 3—10 раз (в зависимости от состава и свойств грунтов) превышающими глубину исследований. В некоторых случаях используют установки

по схеме ВЭЗ с малыми разностями между питающими электродами (микроВЭЗ), при помощи которых определяют ориентировочную глубину оттаивания грунтов и мощность вечномерзлых грунтов (до определенных пределов). Мерзлое состояние грунта устанавливается здесь по резко повышенным значениям УЭС. Вообще значения УЭС для мерзлых грунтов в несколько раз больше соответствующих значений для аналогичных по составу и свойствам талых грунтов и обычно не бывают меньше 800—1000 ом/м, возрастая иногда до 2000—3000 ом/м и более.

Электропрофилирование применяется для определения границ участков талых и вечномерзлых грунтов, а также для выявления скоплений подземных льдов. При помощи электропрофилирования может также проследиваться по глубине положение границы между талыми и мерзлыми грунтами. Параметры схемы ЭП выбираются на основе материалов, полученных при ВЭЗ в данных конкретных условиях, и с учетом задач, для решения которых ставится электропрофилирование. Обычно шаг ЭП составляет 10—20 м.

Малоглубинная сейсморазведка в зависимости от наличия аппаратуры и задач, которые необходимо решать, проводится методом преломленных волн (МПВ) и методом отраженных волн (МОВ) при ручном или механическом возбуждении колебаний в грунте. Методы возбуждения колебаний с помощью взрывов при изысканиях обычно не используются, т. к. ручной и механический методы, как правило, обеспечивают необходимую глубинность исследований.

Основной особенностью сейсморазведки методом преломленных волн является возможность с ее помощью выделения любых контактов в разрезе, если после каждого такого контакта при движении сверху вниз скорости распространения упругих волн увеличиваются. Поэтому, в частности, методом МПВ можно установить положение кровли вечномерзлых грунтов и выделить в разрезе разности грунтов при условии, что с глубиной их температура понижается и льдистость увеличивается.

Если же какой-либо слой характеризуется повышенной льдистостью, а в подстилающих слоях льдистость меньше, то глубинность МПВ будет ограничена отметкой кровли слоя с повышенной льдистостью. Практически наиболее льдистая зона в грунтах находится в интервале глубин от 3—4 до 7—10 м. Поэтому на участках, где не развиты подземные льды близко к поверхности, глубинность МПВ ограничивается указанными выше величинами и с помощью этого метода определяется глубина сезонного оттаивания грунтов и кровли льдистых слоев. В случае несливающейся мерзлоты положение кровли вечномерзлых грунтов может быть определено, если глубина их сезонного промерзания не превышает 0,5 м (на момент исследований).

При наиболее благоприятных условиях глубинность сейсморазведки МПВ определяется величиной импульса, в результате

которого в грунтах возбуждаются сейсмические колебания. При ручном ударе глубинность исследований находится в пределах 40—50 м, а при механическом — может достигать 100—120 м. Максимальная глубина выделяемого контакта составляет соответственно 35—40 и 80—90 м.

Сейсморазведка методом отраженных волн имеет ту же глубинность, что и при использовании МПВ, но максимальная глубина выделяемого контакта совпадает с глубинностью. В отличие от МПВ методом отраженных волн выделяются практически любые контакты в разрезе в пределах глубины исследований. Поэтому, помимо определения глубины сезонного оттаивания или промерзания грунтов, МОВ позволяет выделять в разрезе литологические разности, льдонасыщенные грунты и подземные льды, а также определять положение подошвы вечномерзлых грунтов, если последняя находится в пределах допускаемой глубины исследований. Не вызывает сомнений, что сейсморазведку МОВ применять гораздо целесообразнее, чем МПВ. Однако если применение МПВ возможно при использовании сравнительно недорогой и легкой одноканальной сейсморазведочной установки (например, ОСУ-1 или ее аналогов), то МОВ может применяться лишь при использовании достаточно дорогостоящих многоканальных установок сейсморазведки, которые тем не менее в настоящее время при изысканиях стали распространяться все шире.

Интерпретация материалов сейсморазведки, кроме случая выделения первого контакта методом преломленных волн, должна обязательно основываться на данных параметрических измерений скоростей упругих волн в опорных скважинах или же, по крайней мере, на использовании разрезов скоростей упругих волн, полученных при постановке точек сейсморазведки возле скважин.

Скорости упругих волн в мерзлых грунтах значительно превышают скорости в аналогичных по составу и свойствам талых грунтах. Их значения возрастают по мере понижения температуры и увеличения льдистости грунтов. Обычно значения скоростей в мерзлых грунтах в зависимости от тех или иных факторов колеблются в пределах от 1,0—1,5 до 3—4 тыс. м/сек, а для подземных льдов иногда достигают значений, характерных для наиболее монолитных скальных грунтов.

Лед является основным фактором увеличения УЭС и скоростей упругих волн в мерзлых грунтах, но характер его влияния в этих случаях различен. Увеличение льдистости резко уменьшает проводимость грунта, т. к. лед — прекрасный изолятор. Скорости же возрастают благодаря цементирующему воздействию льда. Поэтому в принципе возможны случаи, когда в грунтах, обладающих только льдом-цементом, скорость упругих волн будет больше, чем в грунтах с ледяными прослойками, способствующими иногда возникновению трещин (пор замерзания).

Скважинные исследования ведутся в основном с целью определения параметрических значений УЭС и скоростей упругих волн для всех основных грунтовых разностей в пределах необходимой для изучения глубины. Поэтому глубина скважин для каротажных работ может быть достаточно большой и определяться иногда глубиной соответствующего геофизического метода. Однако во всех случаях проведения изысканий, кроме изысканий для рабочих чертежей, когда геофизические работы проводятся только по трассам линейных сооружений (ЭП), глубинность исследований ограничивается глубиной распространения годовых колебаний температуры. Вот почему для скважинных исследований может быть использована любая инженерно-геологическая скважина. Обычно для этих работ выбираются скважины, расположенные в центре достаточно однородных по ландшафту участков, т. к. это позволяет провести каротаж по наиболее типичным грунтовым разностям.

Параметрические значения УЭС при скважинных исследованиях определяются методом каротажа сопротивлений (КС) или бокового каротажного зондирования (БКЗ). Параметрические значения скоростей упругих волн находят методом сейсмоакустического (ультразвукового) каротажа. Если позволяют условия, соответствующие параметрические значения могут определяться и лабораторным путем, что представляется наиболее перспективным вследствие меньшей трудоемкости работ.

Весьма интересные результаты именно при изысканиях на мерзлоте сулят радиотепловой метод и метод регистрации инфракрасного излучения грунтов. Следует ожидать, что многие задачи, требующие для своего решения длительных, трудоемких и дорогостоящих исследований, легко решались бы, например, при анализе инфракрасных аэрофотоснимков местности.

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ

§ 1. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Сложность процессов, протекающих в вечномерзлых грунтах, и известная неполнота наших представлений о них вызывают необходимость построения тех или иных моделей грунтов при исследовании этих процессов. Так, при изучении температурного режима грунтов принимают, что они обладают свойствами твердого тела. Твердые тела характеризуются следующими свойствами, имеющими значение для процессов теплообмена: невозможностью взаимного механического перемещения слагающих эти тела частиц; способностью проводить тепло и сопротивляться распространению тепла; способностью накапливать и расходовать тепло; способностью выделять или поглощать тепло при изменении агрегатного состояния; способностью обмениваться теплом с омывающей тело жидкой или газообразной средой; способностью обмениваться теплом с другими телами излучением. Первое из этих свойств твердого тела и отличает его в основном от реальных грунтов, в которых происходят процессы массопереноса, главным образом за счет миграции влаги. Все остальные свойства твердого тела практически совпадают со свойствами реальных грунтов.

Принимая эту модель грунтов за основу при изучении процессов теплообмена в них, мы, таким образом, не учитываем процессов массообмена в грунтах и связанной с массообменом передачи тепла конвекцией. В принципе можно и в такой модели грунта учитывать миграцию влаги и конвективный теплообмен, но при решении инженерных задач в настоящее время по техническим причинам это не представляется возможным. Не учитывается также лучистый теплообмен, происходящий в массиве грунта.

Все эти допущения являются источником определенных ошибок, но, по-видимому, не таких уж больших, в чем убеждает хорошее в общем совпадение результатов теплотехнических расчетов с натурой. И это не случайно. Есть основания полагать, что в большинстве случаев изучения температурного режима грунтов исследуемые объемы грунта можно рассматривать в качестве замкнутых систем, т. е. принимать, что влагообмен

этих объемов с окружающими и подстилающими массивами грунта крайне незначителен. В этом случае ошибки за счет неучета процессов массопереноса, особенно при расчете полных годовых циклов температурного режима, взаимно компенсируются, и суммарная ошибка может быть крайне невелика. То же самое можно сказать и относительно процессов лучистого теплообмена внутри грунтов. Эти процессы происходят внутри пор и, по-видимому, в основном взаимно уравниваются.

Таким образом, можно считать, что принятая модель грунта, а также допущения, вытекающие из природы этой модели или вводимые нами по иным причинам, не препятствуют успешному рассмотрению процессов теплообмена в грунтах.

Рассмотрим свойства модели или, что то же самое, реальных грунтов, упомянутые выше. Способность грунтов проводить тепло или сопротивляться его распространению выражается следующими зависимостями:

$$Q_1 = \frac{\Delta t_1}{R} \Delta \tau \quad (24)$$

и

$$R = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\Delta l}{F}, \quad (25)$$

где Q_1 — количество тепла, проходящее через какой-либо слой при установившемся тепловом процессе;

Δt_1 — разность температур на границах этого слоя;

$\Delta \tau$ — время протекания теплового процесса;

R — термическое сопротивление слоя, через который проходит тепло;

Δl — мощность этого слоя;

F — площадь поперечного сечения, через которое проходит тепло.

Способность грунта отдавать или накапливать тепло выражается следующим образом:

$$Q_2 = C_{об} \Delta t_2, \quad (26)$$

где Q_2 — количество тепла, полученное или отданное некоторым объемом грунта при изменении его температуры на величину Δt_2 ;

$C_{об}$ — объемная теплоемкость грунта.

Способность грунта отдавать или поглощать тепло при изменении его агрегатного состояния, т. е. при фазовых переходах воды в лед и обратно, выражается зависимостью

$$Q_{с.т} = \gamma_{ск} \frac{W_{вес}}{100} i \cdot 80, \quad (27)$$

где $Q_{с.т}$ — количество тепла, отданное или поглощенное грунтом при фазовых переходах воды в этом грунте;

$\gamma_{ск}$ — объемный вес скелета грунта;

$W_{\text{вс}}$ — суммарная весовая влажность грунта;
 i — относительная льдистость грунта, равная отношению веса льда-цемента, содержащегося в грунте (при минимальной отрицательной его температуре), к весу всей воды в грунте.

Поскольку в инженерных расчетах конвективный и лучистый теплообмен не учитывается, соответствующие уравнения этих процессов здесь не приводятся.

Способность грунтов проводить тепло была рассмотрена исходя из условий установившегося или стационарного теплового

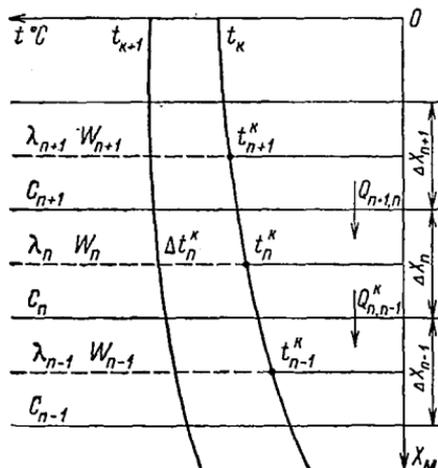


Рис. 6. К выводу уравнения нестационарной теплопроводности

процесса, т. е. процесса, при котором температуры на границах слоя остаются постоянными. Однако в реальных грунтах условия теплообмена на их границах, в особенности на верхней границе, постоянно изменяются, и уравнение (24) практически может быть справедливо для каких-то элементарных прослоев грунта и для незначительных промежутков времени. Если же разбить исследуемую область грунта на такие элементарные прослои (объемы), а неустановившийся температурный процесс — на бесконечно большое число малых промежутков времени, то в течение каждого из этих

промежутков можно использовать для подсчета теплообмена каждого элементарного объема со всеми его окружающими элементарными объемами зависимости, справедливые для установившегося процесса.

Воспользуемся этим обстоятельством и выведем уравнение неустановившегося (нестационарного) теплового процесса для одномерного случая [18], т. е. для случая, когда тепловой поток распространяется в одном направлении.

В полупространстве (рис. 6) выделим три элементарных слоя грунта (n ; $n - 1$; $n + 1$) с разными свойствами. Поскольку в грунте при изменении его температуры происходят фазовые переходы воды в лед и обратно, в нем имеются объемные источники (или стоки) тепла $Q_{с.т}(x, \tau)$. Тепловыделение или теплопоглощение $Q_{с.т}$ в любой точке элементарного слоя (объема) зависит, естественно, от координаты этой точки x и от времени протекания теплового процесса τ .

Рассмотрим тепловой баланс слоя n в призме с поперечным сечением $\Delta y \Delta z$ за интервал времени $\Delta \tau_n$, в течение которого

температура в этом слое изменилась от t_k до t_{k+1} , причем $\Delta x_n = \Delta x_{n+1} = \Delta x_{n-1} = \Delta x$.

Тепловой поток направлен от слоя $n+1$ к слою $n-1$. За время $\Delta \tau_k$ в слой n из слоя $n+1$ поступило $Q_{n+1, n}^k$ тепла, а в слой $n-1$ из слоя n ушло $Q_{n, n-1}^k$ тепла. За счет фазовых переходов, происходивших в слое n за время $\Delta \tau_k$, в него поступило $Q_{с.т., n}^k$ тепла. Разность поступившего и ушедшего тепла в слое n составила величину ΔQ_n^k , которая по истечении времени $\Delta \tau_k$ изменила его температуру на величину

$$\Delta t_n^k = \frac{\Delta Q_n^k}{C_n}, \quad (28)$$

где $C_n = C_{об} \Delta x \Delta y \Delta z$.

Напишем тепловой баланс слоя n за время $\Delta \tau_k$:

$$\Delta Q_n^k = Q_{n+1, n}^k - Q_{n, n-1}^k + Q_{с.т., n}^k, \quad (29)$$

или на основании уравнений (24) и (26)

$$C_n \Delta t_n^k = \frac{t_{n+1}^k - t_n^k}{R_{n+1, n}} \Delta \tau_k - \frac{t_n^k - t_{n-1}^k}{R_{n, n-1}} \Delta \tau_k + Q_{с.т.} \Delta x \Delta y \Delta z \Delta \tau_k. \quad (30)$$

Подставив в это уравнение значение R из формулы (25) и разделив все на $\Delta \tau_k \Delta x \Delta y \Delta z$, получим:

$$C_{об} \frac{\Delta t_n^k}{\Delta \tau_k} = \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{t_{n+1}^k - t_n^k}{\lambda_{n+1, n}} - \frac{t_n^k - t_{n-1}^k}{\lambda_{n, n-1}} \right) + Q_{с.т.} \quad (31)$$

Если толщина слоев x становится бесконечно малой, а интервалы времени будут также стремиться к нулю, то это уравнение превратится в дифференциальное уравнение с частными производными. Переходя к пределу, получим при $\Delta \tau_k \rightarrow 0$ и $\Delta x \rightarrow 0$

$$C(x) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(x) \frac{\partial t}{\partial x} \right] + Q_{с.т.}(x, \tau), \quad (32)$$

поскольку $\lim_{\Delta \tau \rightarrow 0} \frac{\Delta t_n^k}{\Delta \tau_k} = \frac{\partial t}{\partial \tau}$

и

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[\frac{1}{\Delta x} \left(\frac{t_{n+1}^k - t_n^k}{\lambda_{n+1, n}} - \frac{t_n^k - t_{n-1}^k}{\lambda_{n, n-1}} \right) \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(x) \frac{\partial t}{\partial x} \right].$$

Уравнение (32) называется уравнением неустановившейся (нестационарной) теплопроводности с условием фазовых переходов и действительно при условии, что тепловой процесс является одномерным, т. е. грунты по горизонтали однородны и тепловой поток направлен вертикально,

Следует сделать небольшую оговорку относительно обозначений. Всюду для определения глубины нами применяется символ z . В уравнении (32) символ x также применен для обозначения координаты по глубине, поскольку традиционно при описании одномерных процессов используется этот символ. Так что для единообразия в обозначениях уравнение (32) можно переписать в следующем виде:

$$C(z) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(z) \frac{\partial t}{\partial z} \right] + Q_{c. \tau}(z\tau). \quad (33)$$

Рассматривая тепловой баланс элементарного объема при условии, что тепловой поток, проходящий через него, разлагается на составляющие по осям x , y и z , можно аналогичным путем вывести уравнение для случая трехмерной теплопередачи.

$$C \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + Q_{c. \tau}(x, y, z, \tau), \quad (34)$$

где $C = C(x, y, z)$ и $\lambda = \lambda(x, y, z)$.

Это уравнение исчерпывающим образом (с учетом сделанных нами допущений) определяет процессы теплообмена в грунтах и, в частности, в вечномёрзлых грунтах. Однако в общем случае это уравнение имеет множество решений. Поэтому для расчета температурного режима грунтов следует определять условия однозначности его решения. Для того чтобы решение было однозначным, необходимо: выделить область исследования (объем массива грунта), для расчета температурного режима грунтов в которой используется уравнение; задать необходимые для расчета физические и теплофизические характеристики грунтов области исследований; задать начальное распределение температур в грунтах области исследований — температурное поле на момент начала расчета (начальные условия) и определить условия теплообмена грунтов в области исследований с окружающими и подстилающими грунтами, а также через их поверхность (граничные условия). Следует отметить, что эти условия однозначности должны быть заданы при любом способе расчета температурного режима грунтов.

Существуют также некоторые частные закономерности, определяющие распространение тепловых волн в грунтах, но только без учета фазовых переходов (то есть эти закономерности действуют либо только в мерзлых, либо только в талых грунтах. Для промерзающих и оттаивающих грунтов они недействительны). К их числу относятся три закона Фурье, первый из которых (14) был приведен в § 5 предыдущей главы. Второй закон устанавливает, что температурные колебания в грунте происходят со сдвигом фаз, который пропорционален глубине:

$$\delta_z = \frac{1}{2} Z \sqrt{\frac{C_{об} T}{\pi \lambda}}; \quad (35)$$

Третий закон гласит: глубина проникновения колебаний в грунт зависит от периода колебаний на их поверхности. Для температурных колебаний с периодами T_1 и T_2 глубины Z_1 и Z_2 , на которых происходит одинаковое относительное изменение температуры, связаны соотношением

$$\frac{Z_2}{Z_1} = \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}. \quad (36)$$

Следует привести еще одну закономерность, которая называется «условием Стефана» и определяет продвижение границы промерзания или оттаивания в одномерном случае. Продвижение границы промерзания (оттаивания) вниз на глубину dz за время $d\tau$ происходит в том случае, если количество тепла, уходящего (приходящего) за время $d\tau$ от границы промерзания (к границе протаивания) вверх в мерзлую зону (сверху из талой зоны), оказывается больше количества тепла, поступающего (отводящегося) за это время из подстилающей талой (мерзлой) зоны

$$\lambda_T \frac{\partial t_T(z, \tau)}{\partial z}; \left(\lambda_M \frac{\partial t_M(z, \tau)}{\partial z} \right)$$

на величину $Q_{c. \tau} dz$, т. е.

$$\lambda_M \frac{\partial t_M(z, \tau)}{\partial z} - \lambda_T \frac{\partial t_T(z, \tau)}{\partial z} = Q_{c. \tau} \frac{dz}{d\tau} \quad (37)$$

или в случае оттаивания

$$\lambda_T \frac{\partial t_T(z, \tau)}{\partial z} - \lambda_M \frac{\partial t_M(z, \tau)}{\partial z} = Q_{c. \tau} \frac{dz}{d\tau}. \quad (38)$$

Можно было бы и не переписывать этого уравнения для случая оттаивания, поскольку знак левой части уравнения (37) вполне определяет направление процесса.

Приведенные выше закономерности теплообмена в грунтах служат основой для всевозможных теплотехнических расчетов. Но во всех случаях их применений обязательно следует определять условия однозначности решения.

При изложении закономерностей теплообмена в грунтах рассматривались одномерный и трехмерный тепловые процессы. В некоторых случаях говорят о двухмерной области исследований. Однако правильнее говорить о соответствующей характеристике теплового потока, который и определяет, какую область исследований следует рассматривать.

Реальный тепловой поток в грунтах всегда трехмерен, что обусловлено изменчивостью их свойств, вследствие которой даже при сообщении каким-либо объемам одинаковых количеств тепла в них формируются различные температуры. Существует и вторая причина того, что тепловой поток в грунтах трехмерен. Поверхность грунтов обычно характеризуется изменчивостью

условий теплообмена (разная растительность, снег, экспозиция и т. п.), в результате чего в грунт на разных участках поступают (или уходят) разные количества тепла.

Говоря о трехмерном тепловом процессе, имеют в виду, что тепло распространяется в грунтах не только по какой-нибудь прямой линии (одномерный процесс) и не только в какой-либо плоскости (двухмерный процесс), а в объеме. Однако при решении инженерных (и не только инженерных) задач в некоторых случаях приходится прибегать к схематизации реальных условий. Схематизацией реальных условий является и допущение о существовании в природе (в грунтах) одномерных и двухмерных тепловых процессов.

Под трех-, двух-, и одномерным тепловым потоком следует понимать такой поток, проекции вектора которого определены величиной, отличной от нуля, соответственно на трех, двух или одной осях прямоугольных координат.

В зависимости от конкретных условий выбирается пространственная характеристика теплового процесса и области исследований, т. е. пространственная характеристика задачи. Для изучения одномерного теплового процесса выбирается одномерная область исследований, для двухмерного — двухмерная, для трехмерного — трехмерная.

Одномерный тепловой процесс выбирается при возможности следующих допущений:

а) свойства грунтов могут изменяться лишь в одном направлении, обычно по вертикали, или же грунты однородны;

б) граничные условия, отличные от нуля, существуют лишь на границах области исследований, перпендикулярных к направлению теплового потока. На каждой из этих границ назначается лишь по одному из граничных условий; это значит, что на протяжении всей границы теплообмен во всех ее точках совершенно одинаков за один и тот же промежуток времени. Допускается изменение граничных условий во времени. На остальных границах области исследований теплообмен должен быть равен нулю. Каждое из этих допущений необходимо, но не достаточно. Достаточным признаком одномерного процесса является наличие обоих допущений.

Для двухмерного процесса принимаются следующие допущения:

а) свойства грунтов изменяются лишь в одном направлении (или грунты однородны), но при этом хотя бы на одной границе области исследований граничные условия изменяются на протяжении этой границы. Изменение граничных условий допускается лишь в одном направлении, находящемся в плоскости, в которой распространяется тепловой поток;

б) свойства грунтов изменяются в двухмерной области (в плоскости);

в) граничные условия изменяются на каждой из границ.

Каждое из этих допущений служит достаточным признаком двухмерного теплового процесса, требующего для своего изучения исследований в двухмерной области.

Все остальные случаи теплообмена в грунтах нельзя сводить к одно- или двухмерному тепловым процессам, и они требуют для своего изучения назначения трехмерной области исследований. Перечислим достаточные признаки трехмерного теплового процесса:

а) свойства грунтов изменяются в одном или двух направлениях (линейно или в плоскости), но хотя бы на одной из границ области исследований граничные условия изменяются в плоскости, перпендикулярной к плоскости, в которой изменяются свойства грунтов;

б) свойства грунтов изменяются в пространстве.

Во всех этих случаях область исследований рассматривалась в прямоугольной системе координат, а границы области полагались плоскими. Нетрудно заметить, что нарушение последнего условия переводит одномерный тепловой процесс в двухмерный. В самом деле, тепловой поток через границу будет проходить уже в двух направлениях (сверху и с боков), что приведет к возникновению двухмерного теплового потока в области исследований.

Измерение конфигурации границ в плоскости теплового потока в двухмерной задаче не меняет ее пространственной характеристики. Для такого изменения необходимо, чтобы изменение граничных условий или свойств грунтов произошло в направлении, перпендикулярном плоскости распространения теплового потока.

Наиболее универсальной является двухмерная схема теплообмена. Практически все случаи прогнозирования температурного режима грунтов в инженерных задачах можно свести к этой схеме.

§ 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОСНОВАНИЙ И ФУНДАМЕНТОВ

При проектировании оснований и фундаментов используются как обобщенные характеристики температурного режима вечномерзлых грунтов, так и температурные распределения (температурные поля), характеризующие грунты оснований в целом в те или иные моменты времени всего периода эксплуатации проектируемых зданий и сооружений.

Как отмечалось, при изысканиях для технического проекта в целях инженерно-геологического мерзлотного районирования и предварительного определения глубин заложения фундаментов находят обобщенные показатели температурного режима. В качестве исходных данных (начальных условий) для прогнозирования используют непосредственно измерения температур в

скважинах. Кроме обобщенных характеристик, при изысканиях для технического проекта определяют температурные поля грунтов оснований, рассчитанные в условиях совместной с грунтами работы зданий и сооружений. Температурные поля определяют также и при изысканиях для рабочих чертежей; в этом случае они имеют уточняющее значение.

При изысканиях для технического проекта расчет температур ведут на предмет определения возможности использования вечномерзлых грунтов в качестве оснований с сохранением их вечномерзлого состояния или без этого сохранения. Расчет температурного режима производится по участкам площадки (трассы), выделенным при ее районировании, для тех зданий или сооружений, которые предполагается разместить на этих участках. При этом в расчет принимают средние ИГМ условия этих участков (средние значения свойств грунтов).

Нет необходимости рассчитывать температурный режим для каждого здания или сооружения, которое проектируется на площадке (трассе). В данном случае целесообразно группировать их в однородные по тепловыделению группы и расчет вести для одного здания или сооружения каждой группы. Следует отметить, что и размещать здания и сооружения на тех или иных районированных, т. е. однородных по ИГМ условиям, участках необходимо по принципу их тепловой однородности. На основании этого расчета выбирают принцип использования вечномерзлых грунтов на тех или иных участках площадки в качестве оснований для конкретных зданий и сооружений и технические решения оснований и фундаментов.

При изысканиях для рабочих чертежей расчет производится для конкретных зданий и сооружений и для конкретных участков их размещения, причем в качестве исходных данных используют соответствующие характеристики грунтов по этим конкретным участкам, а также технические решения оснований и фундаментов, предусмотренные техническим проектом каждого здания или сооружения.

Прогнозировать температурный режим грунтов при изысканиях для технического проекта можно дважды: для проверки возможности сохранения вечномерзлого состояния грунтов, когда в расчете учитываются специальные мероприятия (например, устройство проветриваемых подполий), и в условиях непосредственного контакта здания или сооружения с вечномерзлыми грунтами. Если специальные мероприятия не учитываются, то один расчет может служить основанием для выбора принципа использования вечномерзлых грунтов в качестве оснований и предварительного определения параметров оснований и фундаментов в пределах этого выбранного принципа.

При изысканиях для рабочих чертежей температурный режим прогнозируют с полным учетом материалов технического проекта по основаниям и фундаментам.

Во всех случаях определения характеристик температурного режима температурные поля грунтов оснований для тех или иных моментов времени рассматриваются в пределах термоактивной зоны от зданий и сооружений по площади и по глубине. Если термоактивные зоны соседних зданий или сооружений перекрываются, то прогнозирование температурного режима для участков, на которых они расположены, следует вести совместно.

Время, в течение которого рассчитывается температурный режим грунтов оснований, в принципе должно быть равно расчетному сроку эксплуатации соответствующих зданий и сооружений. Однако почти всегда температурный режим грунтов стабилизируется значительно раньше этого срока. Стабилизация выражается в том, что в грунтах оснований устанавливаются устойчивые периодические колебания температуры, затухающие с глубиной. Под устойчивостью понимается постоянство глубин сезонного оттаивания и промерзания, колебаний положения подошвы чаши оттаивания, проявляющихся обычно под краевыми частями зданий и сооружений, амплитуд и предельных значений температур в зонах, где не происходит фазовых переходов.

После того как наступит такой устойчивый периодический режим грунтов, т. е. его относительная стабилизация, дальнейший расчёт их температурного режима уже не имеет смысла.

§ 3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О ПРОГНОЗИРОВАНИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ

Для того, чтобы решение уравнения нестационарной теплопроводности (34) стало конкретным, необходимо в каждом случае определять условия его однозначности. К числу этих условий относятся пространственная характеристика исследуемого теплового процесса, принятая для данного случая решения задачи; соответствующая пространственная характеристика и размеры заданной области исследований; входящие в уравнение физические и теплофизические характеристики грунтов, слагающих область исследований; начальное (на момент начала расчета) распределение температур в области исследований, т. е. начальные условия, а также количественная характеристика теплообмена через каждую границу области исследований в течение всего времени решения задачи, т. е. граничные условия. Физические и теплофизические характеристики грунтов, зависящие от температуры, должны быть определены как функция температуры грунтов в любой точке области исследований.

Следует отметить, что говоря об одномерной или двухмерной области исследования, всегда понимают под этим область, обладающую объемом. Только для этих областей размеры в направлениях, перпендикулярных к тепловому потоку (плоскости

теплового потока), устанавливают равными единице длины, в которых измеряется область, что позволяет вести расчет в числах, не принимая во внимание соответствующие единичные множители.

К числу условий однозначности решения следует отнести также принимаемое для расчета одно из двух условий: промерзание (оттаивание) грунта с образованием границы промерзания (оттаивания) или с образованием зоны промерзания (оттаивания). Условие промерзания или оттаивания с образованием соответствующей границы является допущением по отношению к реальной картине, когда грунт промерзает или оттаивает в некоторой зоне отрицательных температур. Это допущение по различным причинам не влечет за собой сколько-нибудь значительных ошибок. Как это, так и все прочие условия однозначности решения могут назначаться с теми или иными допущениями, принятие которых должно быть обосновано в каждой конкретной задаче.

Смысл задачи прогнозирования температурного режима грунтов заключается в том, что на некоторую ограниченную область исследований (грунтовый массив), начальные условия и свойства грунтов в которой известны, начинают с некоторого момента воздействовать граничные условия на всех границах области в течение определенного времени. В течение этого времени под воздействием граничных условий в области исследований в соответствии с закономерностями теплообмена в грунтах происходят изменения температур (в частном случае возможна абсолютная или относительная их стабилизация). Температуры в различных точках области формируются в зависимости от свойств грунтов в этих точках (элементарных объемах). Граничные условия на поверхности грунта назначаются исходя из количественной характеристики теплообмена через эту поверхность, которая зависит от естественных климатических факторов, а также от условий строительства и эксплуатации зданий и сооружений. Начальные и граничные условия называются краевыми условиями, а тип задач с краевыми условиями — краевыми задачами, т. е. их решение невозможно без задания этих условий.

В общем виде краевую задачу прогнозирования температурного режима грунтов можно поставить следующим образом.

В области исследований M , сложенной грунтами, свойства которых $P(x, y, z, \tau)$, найти температурное поле T_1 для момента времени τ_1 или последовательную совокупность температурных полей $T_1, T_2, \dots, T_n [T(x, y, z, \tau)]$ для момента времени $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$, причем $\tau_0 < \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_n$, где τ_0 ($\tau_0 = 0$) — начальный момент времени, которому соответствует температурное поле T_0 (начальные условия), если на область M в течение интервала времени $\tau_n - \tau_0$ действуют на всех границах граничные

условия $\Gamma(x, y, z, \tau)$ и в ней имеются источники и стоки тепла $Q_{с.т}(x, y, z, \tau)$, работа которых обусловлена фазовыми превращениями влаги в грунтах при их замерзании или оттаивании, а также другими причинами. Теплообмен в грунтах описывается уравнением нестационарной теплопроводности (34).

§ 4. ПРИБЛИЖЕННЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА СОСТАВЛЯЮЩИХ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ

Расчет температурных полей в грунтах и определение на этой основе составляющих температурного режима возможны только путем решения уравнения нестационарной теплопроводности (34). Однако, как оказалось, точные аналитические решения этого уравнения даже в простейших случаях отсутствуют, что обусловлено трудностями, возникающими при попытке учета условия Стефана (37) на границе между мерзлыми и тальми грунтами. Из-за этих трудностей уравнение нестационарной теплопроводности решается аналитически только приближенно для случая одномерного теплового процесса с теми или иными допущениями [9, 11, 17, 18, 42 и др].

Правда, существуют точные решения задачи в случае одномерного теплового процесса для однородной среды, реализуемые численными методами с использованием ЭЦВМ [20, 32]. Приближенных же аналитических методов для случаев двухмерного или трехмерного нестационарных процессов нет.

Приближенными аналитическими методами решают уравнение (34) относительно нулевой температуры, т. е. получают глубину промерзания или оттаивания грунтов за какое-либо время. Граничные условия включаются непосредственно в расчетные формулы и поэтому могут быть заданы только как постоянные величины.

Наиболее простой формулой, выведенной приближенным путем, является уже упоминавшаяся формула Стефана (5). При выводе формулы сделаны допущения об однородности грунта и о том, что начальное распределение температур одинаково во всей области и равно 0°C . На поверхности грунта в начальный момент времени задается и в дальнейшем поддерживается постоянная температура t_n . Но формула Стефана не учитывает того, что грунты до начала промерзания нагреты и перед промерзанием выхолаживаются. В этом главный практический недостаток формулы.

Аналогичная ошибка возникает и при расчете оттаивания грунтов. Поэтому непосредственное применение формулы Стефана ограничивается чисто прикидочными расчетами. Зато ее целесообразно использовать для различных пересчетов глубин сезонного промерзания или оттаивания, полученных путем непосредственных измерений, например так, как это было показано в § 5 гл. III.

Одной из наиболее точных формул является формула В. С. Лукьянова и М. Д. Головки [18]:

$$\tau = \left(Q_{c, \tau} + \frac{C_{об}^{M(\tau)} \Theta}{2} \right) \left(\frac{\lambda_{M(\tau)}}{q^2} \ln \frac{\lambda_{M(\tau)} \Theta - qS}{\lambda_{M(\tau)} \Theta - q(Z^{M(\tau)} + S)} - \frac{Z^{M(\tau)}}{q} \right), \quad (39)$$

где τ — длительность зимнего (летнего) периода в ч;

Θ — разность среднезимней (среднелетней) температуры воздуха и температуры промерзания (оттаивания) грунта в град.;

q — средний за зиму (за лето) тепловой поток снизу к границе промерзания (оттаивания) в $\text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$;

S — толщина слоя грунта в м, термическое сопротивление которого равно сопротивлению слоя изоляции поверхности R_n и сопротивлению теплоотдачи с поверхности R_α ;

$$S = \lambda_{M(\tau)} (R_n + R_\alpha); \quad (40)$$

Здесь $R_\alpha = \frac{1}{\alpha}$;

α — коэффициент теплоотдачи с поверхности, принимаемый в данном случае постоянным и равным $20 \text{ ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$;

R_n — определяется по формуле (25).

Формулу (39) относительно глубины $Z^{M(\tau)}$ в явном виде представить невозможно, и поэтому она номографирована. Формула (39) учитывает теплоемкость грунтов в промерзающем (или оттаивающем) слое, а также влияние снега и других различных изоляционных покрытий на поверхности грунта.

При выводе формулы (39) сделаны следующие допущения: грунт однороден; распределение температурного мерзлого (талого) грунта является прямолинейным; теплоизоляция поверхности учитывается путем введения ее термического сопротивления, но без учета ее теплоемкости.

Формулу (39) можно использовать для расчета $Z^{M(\tau)}$ в однородном грунте, меняя величины Θ , S и q . Можно также рассчитывать $Z^{M(\tau)}$ в слоистом грунте, характеристики слоев которого отличаются друг от друга. В этом случае Θ , S и q принимаются постоянными за весь период расчета.

Недостатком формулы В. С. Лукьянова и М. Д. Головки (39) является достаточная неопределенность назначения величин α и q , но при инженерных расчетах формула дает хорошие результаты.

Очень точные значения дают различные формулы В. А. Кудрявцева [9], выведенные на основе анализа теплооборотов в грунтах. Для вывода приближенных аналитических формул очень плодотворен метод Л. С. Лейбензона [17], который использовался многими исследователями [11, 42]. Суть этого метода заключается в том, что задаются произвольными значениями функции $t_M(z, \tau)$ и $t_T(z, \tau)$, так, чтобы они удовлетворяли

начальным и граничным условиям. Затем эти значения подставляются в выражение (37), и полученное дифференциальное уравнение первого порядка разрешается относительно $Z^{(T)}$.

Формулы В. А. Кудрявцева, наиболее полно учитывающие процессы теплообмена в грунтах, целесообразно использовать для ориентировочного определения максимальных глубин чаш оттаивания, а также при определении величин H_+^H и H_-^H .

Формулу В. С. Лукьянова и М. Д. Головки (39) удобно применять с целью определения величины теплоизоляции поверхности грунтов для предохранения их от промерзания или оттаивания и при расчете H_+^H и H_-^H . В остальных случаях приближенные аналитические методы решения уравнения нестационарной теплопроводности для определения составляющих температурного режима грунтов могут быть использованы лишь при расчете значений $Z^{(T)}$ для естественных условий, как это было показано в § 5 предыдущей главы.

Необходимо коротко остановиться на приближенных аналитических методах решения задачи о прогнозировании температурного режима, развиваемых Г. В. Порхаевым [28, 37]. Этот исследователь рассматривает температурный режим грунтов при эксплуатации проектируемых зданий и сооружений, исходя из одновременности воздействия на грунты постоянных по величине энергетических источников, т. е. использует суперпозицию (наложение) решений. Такая постановка задачи возможна при исследовании стационарного (установившегося) температурного режима. Развивая эти представления, Г. В. Порхаев предложил рассматривать температурный режим как ряд последовательно сменяющих друг друга стационарных состояний, что приближает эту модель теплообмена к реальному процессу. Метод Г. В. Порхаева позволяет получать температурные поля в предположении об однородности грунтов. Оценка точности решения Г. В. Порхаева не получена. В связи с принятыми допущениями этот расчетный метод может использоваться для определения очертаний стабилизированной чаши оттаивания, для чего он и используется при проектных работах.

Прогнозирование температурного режима грунтов возможно также методами гидравлических и электрических аналогий на гидро- и электроинтеграторах. Однако в силу ряда причин моделирование температурного режима чрезмерно трудоемко и неизбежно связано с существенной схематизацией задач. Поэтому применение аналоговых устройств ограничено в основном решением учебных или некоторых частных задач.

§ 5. ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ГРУНТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЦВМ

Анализ существующих методов расчета температурного режима грунтов показывает, что ни приближенные аналитические

методы, ни точные решения, ни моделирование в целом не могут обеспечить решения задачи прогнозирования температурного режима вечномёрзлых грунтов оснований для целей инженерной практики. Создавшееся положение заставило обратиться к численным методам, применение которых позволяет получить приближенные решения самых сложных краевых задач математической физики, к числу которых относится и задача прогнозирования. В частности, используется метод конечных разностей. Сущность его заключается в том, что неустановившийся (нестационарный) непрерывный тепловой процесс разбивается во времени на ряд интервалов, в течение которых тепловые потоки принимаются постоянными и пропорциональными разностям температур на границах соответствующей области исследований. Степень приближения к истинному решению в этом случае зависит от того, насколько коротки будут эти интервалы времени.

Действительно, на границах области исследований граничные условия все время меняются, значит меняется и теплоток в самой области. Если выбранный расчетный интервал времени Δt будет настолько краток, что за это время изменение граничных условий будет невелико, то невелика будет и ошибка расчета. Фактически эта ошибка получается за счет осреднения граничных условий на каждой новой границе в области исследований. При стремлении Δt к нулю при прочих равных условиях будет уменьшаться и погрешность расчета.

Решение по методу конечных разностей позволяет учитывать неоднородность состава и свойств грунтов области исследований, поскольку в уравнении нестационарной теплопроводности температура и свойства грунтов определены в любой точке области во времени. Данный метод вообще предполагает дискретность области исследований, поскольку это позволяет в каждый промежуток времени разбить суммарный тепловой поток на ряд составляющих в пределах этой области.

В самом деле, в один и тот же промежуток времени в различных зонах области исследований поток неодинаков. Для грунтового полупространства тепловой поток в общем случае, как известно, уменьшается с глубиной. Понятно, что чем меньше мощность слоя, в котором этот поток рассматривается, тем точнее будет вычислена его величина, т. е. значения температур на границах слоя, под воздействием которых происходит теплообмен, будут ближе к их истинным значениям.

Таким образом, чем меньше расстояние между точками, на которые разбивается непрерывная область и в которых рассчитывается температура грунтов, тем меньше будет погрешность расчета. Для трехмерной задачи соответствующие расстояния между точками Δx , Δy и Δz должны стремиться к нулю. Последнее условие должно выполняться независимо от того, однороден грунт или нет. В общем случае погрешность метода конечных

разностей будет стремиться к нулю, если выполняются условия $\Delta\tau \rightarrow 0$ и $\Delta x \rightarrow 0$, $\Delta y \rightarrow 0$, $\Delta z \rightarrow 0$.

Вывод уравнения нестационарной теплопроводности (34) производился на основе анализа теплового баланса элементарного слоя (призмы) для одномерного теплового процесса. Промежуточное уравнение (31) характеризовало тепловой поток в элементарном слое в конечных разностях. Здесь за интервал времени $\Delta\tau_k$ этот тепловой поток определялся конечными разностями соответствующих температур. Аналогичное уравнение можно составить для двухмерного и трехмерного тепловых процессов в некотором объеме грунта и с его помощью рассматривать в этом объеме и в области исследований в целом двухмерный или трехмерный тепловой процесс.

Если интересующую нас область исследований разбить на элементарные блоки, а время непрерывного теплового процесса разделить на весьма малые промежутки времени $\Delta\tau$, то можно, пользуясь такими уравнениями, рассчитать теплообмен каждого блока со всеми остальными, его окружающими, определить изменение его теплосодержания и изменение температуры в нем за расчетный промежуток времени.

Можно для этой цели воспользоваться основными уравнениями теплопередачи (24)—(26), что одно и то же, вводя дополнительно условие выделения или стока тепла за счет фазовых переходов на границе или в зоне промерзания (оттаивания). В этом случае теплообмен рассчитывается отдельно через каждую грань блока. Учет фазовых переходов при этом достаточно прост.

Например, в случае границы оттаивания при достижении блоком нулевой температуры приходящее тепло расходуется не на дальнейшее повышение температуры, а на плавление льда, т. е. оно должно компенсировать величину скрытых теплот в данном блоке, рассчитанную для него по формуле (27). После того, как весь лед в блоке растает, приходящее тепло расходуется на повышение температуры. Таков физический смысл применения метода конечных разностей для расчета температурных полей в грунтах.

Математическая реализация этого метода может быть очень сложной. В настоящее время разрабатывается ряд приближенных способов расчета в конечных разностях задач нестационарной теплопроводности для одно-, двух- и трехмерного теплового процессов [3, 4, 16, 25]. Все эти решения могут быть получены только с помощью применения электронных цифровых вычислительных машин (ЭЦВМ). Но они имеют достаточно сложную математическую основу, а их описание большей частью доступно только людям с высокой математической квалификацией. Кроме того, в литературе, как правило, отсутствуют программы для соответствующих расчетов на ЭЦВМ. Эти обстоятельства делают их практически недоступными для широкого круга

проектно-исследовательских организаций. Оценка точности этих решений, по крайней мере в теоретическом плане, в настоящее время отсутствует. Практически же эти решения дают достаточно хорошие совпадения с натурными наблюдениями.

Наиболее простым и доступным в математическом плане является приближенное решение уравнения нестационарной теплопроводности в целях прогнозирования температурного режима вечномерзлых грунтов методом сеток по явной схеме, разработанное для использования с помощью ЭЦВМ в 1964 г. [16] и успешно применяемое в настоящее время [36]. Это решение близко к методу элементарных тепловых балансов А. П. Ваничева [5] и основано на анализе тепловых балансов элементарных объемов грунта в области исследований.

На рис. 7 приведен алгоритм этого решения, который описывает теплообмен любого блока, выделенного в области исследований, со всеми окружающими его блоками (или через границу области) за расчетные интервалы времени Δt , на которые разбивается все время расчета. Алгоритм может быть использован для расчета одно-, двух- и трехмерного теплообмена в грунтах. Он содержит 30 вариантов возможного пути расчета теплового баланса и температуры блока в зависимости от комбинаций различных параметров. Алгоритм достаточно просто программируется для расчета температурных полей на ЭЦВМ. При составлении программы к нему присоединяются граничные условия для каждого пограничного блока, способы учета термических сопротивлений при переходе температур блока через 0°C , а также условия и форма вывода результатов расчета, изложенные в следующем параграфе (рис. 7 см. вклейку).

Точность расчета оценивалась путем сравнения результатов, полученных при различных расчетных интервалах времени Δt (шагах по времени) и различных прямоугольных сетках, т. е. различных размерах блоков (пространственных шагах), для двухмерного теплового процесса. В результате сопоставлений оказалось, что величины относительных ошибок возрастают более значительно при увеличении Δt , чем при увеличении $\Delta x \Delta y$. Наибольшая ошибка образуется в верхних горизонтах грунта (до 2—3 м) в начальные интервалы времени расчета. На глубинах 3—6 м и более ошибка уже невелика. На всех глубинах характерно уменьшение ошибок до некоторого постоянного уровня после прошествия определенного времени с начала расчета. Увеличение размеров блоков в нижних горизонтах грунта практически не оказывает влияния на величину ошибки.

Исходя из этих результатов, можно сделать некоторые предварительные практические выводы. При решении двухмерной задачи прогнозирования разбивка области исследований на блоки размером 0,5—1—2 м до глубин 10—15 м и при величине шага по времени Δt порядка 40—50 ч приводит к появлению первоначальной погрешности расчета на первом метре разреза не более

0,7—1,0° С или не более 10 см для границы промерзания или оттаивания. На 3—4 м ошибки уменьшаются до 0,3—0,2° С. Безусловно, трудно говорить об этих ошибках как о максимально возможных, поскольку указанные результаты не являются окончательными. Однако достаточно длительный опыт применения алгоритма показывает, что результаты расчетов обладают высокой степенью совпадения с натурными результатами [36].

Решение задач прогнозирования с использованием приведенного алгоритма целесообразно выполнять на ЭЦВМ с быстродействием не менее 10 000 операций в 1 сек и объемом оперативной памяти не менее 4000 единиц. При составлении программы следует использовать только оперативную память, т. к. это экономит время счета.

Расчет производится обычно на 4—5 лет, на которые температурный режим грунтов оснований, как правило, стабилизируется. Время счета на машинах с указанными характеристиками для двухмерной задачи не превышает 4—5 часов. При этом количество блоков не должно быть больше 600—800, а расчетные интервалы времени 40—50 ч. На более быстродействующих машинах время счета резко сокращается.

§ 6. ПОДГОТОВКА ЗАДАЧИ О ПРОГНОЗИРОВАНИИ К РАСЧЕТУ

Подготовка задачи к расчету заключается в определении пространственной характеристики задачи, выборе области исследований и определении ее размеров, назначении граничных условий на каждой границе области, разбивке области исследований на блоки, назначении начальных условий, назначении и расчете характеристик грунта по каждому блоку.

Пространственная характеристика задачи складывается из пространственной характеристики области исследований и теплового процесса. Пространственная характеристика области определяется условиями залегания грунтов и распределением их свойств в области исследований. При наличии горизонтального напластования грунтов и при условии, что свойства грунтов в пределах слоев более или менее постоянны, область можно считать одномерной. Если при этом на поверхности грунта имеется одно граничное условие, то задача в целом будет одномерной. Указанное совпадение встречается обычно при прогнозировании температурного режима грунтов в естественной обстановке для районированных участков, характеризующихся в своих пределах относительным постоянством условий теплообмена на поверхности и литолого-генетическим единством грунтов.

Очень часто отмечают случаи, когда состав и свойства грунтов изменяются преимущественно в двух направлениях. Почти всегда можно выбрать такую вертикальную плоскость,

которая будет заключать в себе направления наиболее интенсивной изменчивости грунтов. В этих случаях пространственная характеристика области будет двухмерной. Практически любую область можно рассматривать как двухмерную с той или иной степенью приближения.

При определении пространственной характеристики теплового процесса дело обстоит несколько сложнее. Как правило, в задачах прогнозирования приходится иметь дело со зданиями или сооружениями. В зданиях, особенно производственных, и сооружениях во многих случаях температурный режим по площади неодинаков; т. е. создает на поверхности грунта изменчивость граничных условий в двух направлениях, обуславливающих трехмерность теплового процесса. Помимо этого, любое здание или сооружение, если только оно не имеет значительной протяженности, независимо от того, равномерна в нем температура по площади или нет, всегда обуславливает наличие трехмерного теплового потока в грунтах. Если же здание или сооружение имеет значительную протяженность, то в плоской осевой области исследований, перпендикулярной вытянутой стороне такого здания или сооружения, можно считать тепловой поток двухмерным, поскольку влиянием естественных граничных условий за торцами здания или сооружения на температурный режим грунтов в такой плоской области можно пренебречь.

Если здание или сооружение имеет соотношение сторон больше, чем $2:1$, то практически считают, что в области, перпендикулярной длинной стороне, процесс можно считать двухмерным и задачу в целом также (конечно, при условии, что сама область сводится к двухмерной). Во всех остальных случаях следует говорить о трехмерном тепловом процессе и трехмерной задаче. В принципе почти любую трехмерную задачу можно свести к последовательности нескольких двухмерных задач, причем в каждой из последующих задач следует учитывать результаты предыдущих расчетов. Эта операция требует известного опыта.

После определения пространственной характеристики задачи выбирается область исследований. Размеры области должны выбираться таким образом, чтобы в нее были включены все объекты, совокупная работа которых с грунтом исследуется. Кроме того, размеры принимаются с таким расчетом, чтобы предполагаемые зоны теплового влияния зданий и сооружений, для которых прогнозируется температурный режим грунтов оснований, целиком входили в область исследований. Если же термоактивные зоны от соседних зданий или сооружений перекрываются, то область должна включать перекрывающиеся зоны целиком.

Размеры области определяются положением ее границ, значение которых должно удовлетворять назначаемым граничным условиям. Это положение особенно наглядно проявляется

при установлении боковых и нижней границы области. Поэтому назначение границ области исследования и задание на них граничных условий следует рассматривать совместно.

Во всех задачах прогнозирования верхняя граница области практически всегда совпадает с поверхностью грунта. Для одномерной задачи дополнительно определяется положение нижней границы, для двухмерной — нижней и двух боковых, для трехмерной — нижней и четырех боковых границ.

Граничные условия являются важнейшим фактором, определяющим однозначность решения задачи прогнозирования, и поэтому они должны быть заданы на каждой границе области в течение всего времени, за какое определяется температурный режим грунтов. Если внутри области есть источники или стоки тепла, граничные условия задаются и для них. Назначаемые граничные условия должны в максимально возможной степени отвечать реальным условиям теплообмена на границах области исследований и не зависеть от исследуемого температурного режима в области.

Граничные условия могут быть заданы в виде условий первого, второго или третьего рода. В качестве граничного условия первого рода задается независимая температура поверхности границы. Граничное условие второго рода задается теплотокотом через границу области. В качестве граничного условия третьего рода задают температуру среды, омывающей соответствующую границу (для грунтовой области исследований — температуру воздуха), и закон теплообмена через эту границу между окружающей средой (воздухом) и областью — пограничными блоками грунта.

На верхней границе области, положение которой, как уже отмечалось, определяется положением поверхности грунта, обычно задается граничное условие третьего рода. Дело в том, что определить температуру поверхности грунта (условие первого рода) или теплотокоты через эту поверхность (условие второго рода) вперед на все время расчета задачи практически невозможно. Поэтому на верхней границе задают температуру воздуха, а в качестве закона теплообмена между воздухом и пограничными блоками грунта применяют закон охлаждения Ньютона:

$$Q = \alpha (t_n - t_b) F \Delta \tau, \quad (41)$$

где Q — количество тепла, проходящее через поверхность грунта за время $\Delta \tau$;

α — коэффициент теплоотдачи с поверхности грунта, принимаемый обычно постоянным и равным $20 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$;

t_n — зависимая температура поверхности грунта в град;

t_b — температура воздуха в град;

F — площадь поверхности теплообмена в м^2 ,

Коэффициент α в этом уравнении определяет теплоотдачу с поверхности грунта, в основном, за счет конвективного теплообмена. Коэффициент α величина переменная, т. к. зависит главным образом от скорости ветра. Пределы его изменения, по-видимому, составляют обычно 50—70% от номинального значения и поэтому его следовало бы определять для каждого региона. Закон теплообмена в расчете учитывается заданием на верхней границе области термического сопротивления теплоотдаче с поверхности R_α .

Натурные определения коэффициента α чрезвычайно трудоемки, но можно предложить способ его расчета для каждого района работ. Для этого на соответствующей метеостанции берется ход температур воздуха за какой-либо промежуток времени и ход температур грунта на минимальной глубине, на которой на этой метеостанции производятся наблюдения (обычно это 0,2 или 0,4 м). Далее с помощью алгоритма рассчитывается линейный теплообмен между воздухом и грунтом. Производят несколько расчетов, добиваясь того, чтобы рассчитанные температуры грунта совпадали с заданными их температурами, т. е. полученным на метеостанции ходом температур грунта. В каждом расчете задается какое-либо значение коэффициента α . Истинным считается то значение коэффициента α , при котором заданные и рассчитанные значения температур совпадают.

При задании граничных условий третьего рода для открытой поверхности грунта (вне здания) следует учитывать радиационный баланс этой поверхности, рассчитывая приведенную температуру

$$t'_в = t_в + \Delta t_в, \quad (42)$$

где $t'_в$ — приведенная среднедекадная температура воздуха для каждой декады за год (среднедекадная берется потому, что граничные условия задаются годовым ходом температур воздуха по их среднедекадным значениям);

$$\Delta t_в = \frac{\sum R_6}{\alpha}, \quad (43)$$

где $\sum R_6$ — среднедекадная сумма радиационного баланса для каждой декады за год в $\text{ккал}/\text{м}^2$.

Все эти величины входят со своими знаками. Приведенные температуры воздуха могут быть вычислены и для каждых суток, и месячные, и среднегодовые. Тогда величина $\sum R_6$ должна представлять собой соответственно суточную, месячную или годовую сумму радиационного баланса. В климатических справочниках обычно приводятся помесечные суммы $\sum R_6$. Среднедекадные значения рассчитываются поэтому лишь в зависимости от числа дней в каждой декаде (10, 10, 10 или 10, 10, 11, или

10, 10, 8, или 10, 10, 9) данного месяца. Для открытого пространства (41) примет вид:

$$Q = \alpha (t_n - t'_B) F \Delta \tau. \quad (41^I)$$

Когда рассчитывается задача при наличии на верхней границе области зданий и сооружений, полезно определять среднюю затененную ими в году часть верхней границы по величине средней высоты солнца над горизонтом, и для этой части принимать обычную температуру воздуха.

Для той части границы, которая находится внутри зданий или сооружений вместо естественной (приведенной) температуры воздуха задается температура воздуха внутри здания или сооружения:

$$Q = \alpha (t_n - t_B^{\text{зд}}) F \Delta \tau. \quad (41^{II})$$

Для участков границ внутри зданий приходится принимать те же значения коэффициента теплоотдачи с поверхности, что и для открытых участков, хотя в зданиях они будут несколько меньше.

Если климатические справочники дают возможность определять величину не только $\sum R_6$, но и отдельно рассеянной радиации $\sum q_6$, то для затененных участков следует рассчитывать приведенную температуру воздуха t_B^p с учетом рассеянной радиации:

$$t_B^p = t_n + \frac{\sum q_6}{\alpha} \quad (43^I)$$

В некоторых случаях на верхней границе области, когда какое-либо сооружение (например, трубопровод) укладывается непосредственно по грунту, целесообразно задавать граничное условие первого рода, принимая температуру соответствующей границы этого сооружения за температуру поверхности грунта t_n . Но в этом случае в отличие от всех предыдущих величина t_n будет независимой и должна быть задана во времени. Иногда бывает известна теплоотдача какого-либо сооружения непосредственно в грунт, и тогда целесообразно задавать граничное условие второго рода — величину теплообмена сооружения с грунтом во времени.

На верхней границе области исследований граничные условия задаются независимыми друг от друга, каждое на своем участке. Зона действия каждого граничного условия (при ровной границе) отделена друг от друга вертикалями, т. е. массивы блоков, на которые действуют соответствующие граничные условия, также отделены друг от друга теми же вертикальными плоскостями. При наличии на границе выступов, выемок и уступов на соответствующие массивы блоков могут действовать до 3 (в двухмерной задаче) (рис. 8) и до 5 (в трехмерной задаче) граничных условий.

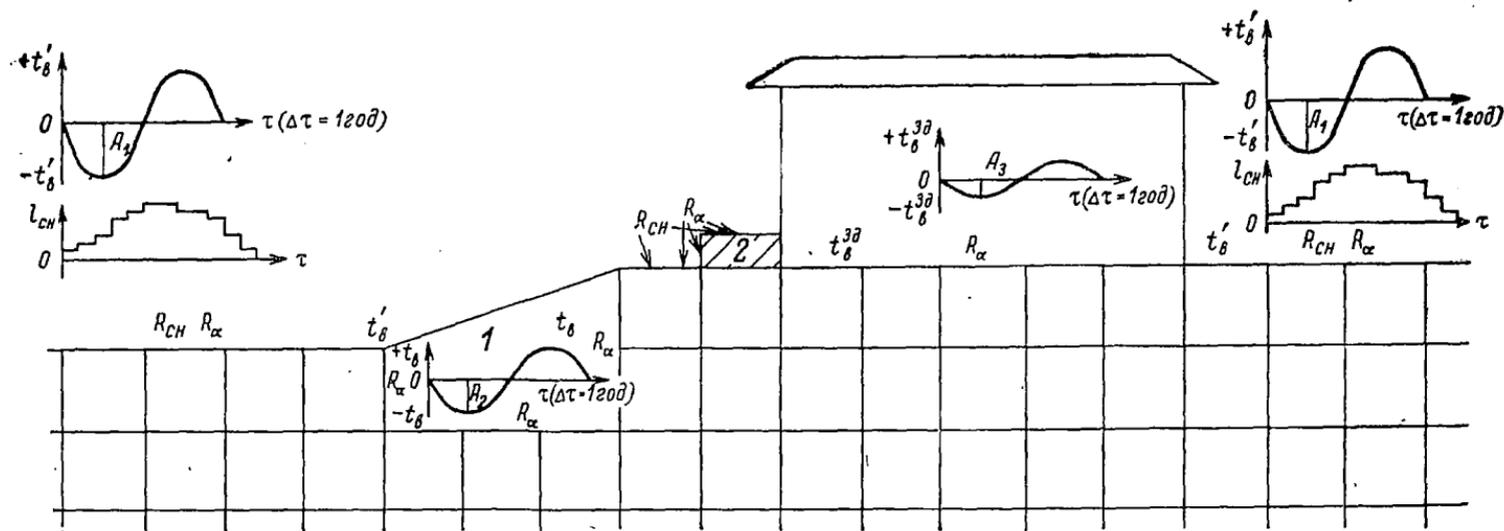


Рис. 8. Схема задания граничных условий на поверхности двумерной области исследований и учет термических сопротивлений изоляции этой поверхности

1 — выемка, перекрытая с поверхности легкими дощатыми плитами; 2 — отмостка

t'_B , t_B , t_B^{3d} — температуры воздуха, действующие на соответствующие поверхности; R_{CH} , R_α — термические сопротивления соответствующих поверхностей; $A_1 \neq A_2 \neq A_3$ — амплитуды температур воздуха на поверхности, в выемке и в здании; l_{CH} — мощность снежного покрова
 Температуры воздуха и мощность снежного покрова заданы как функция времени ($\Delta\tau=1$ году)

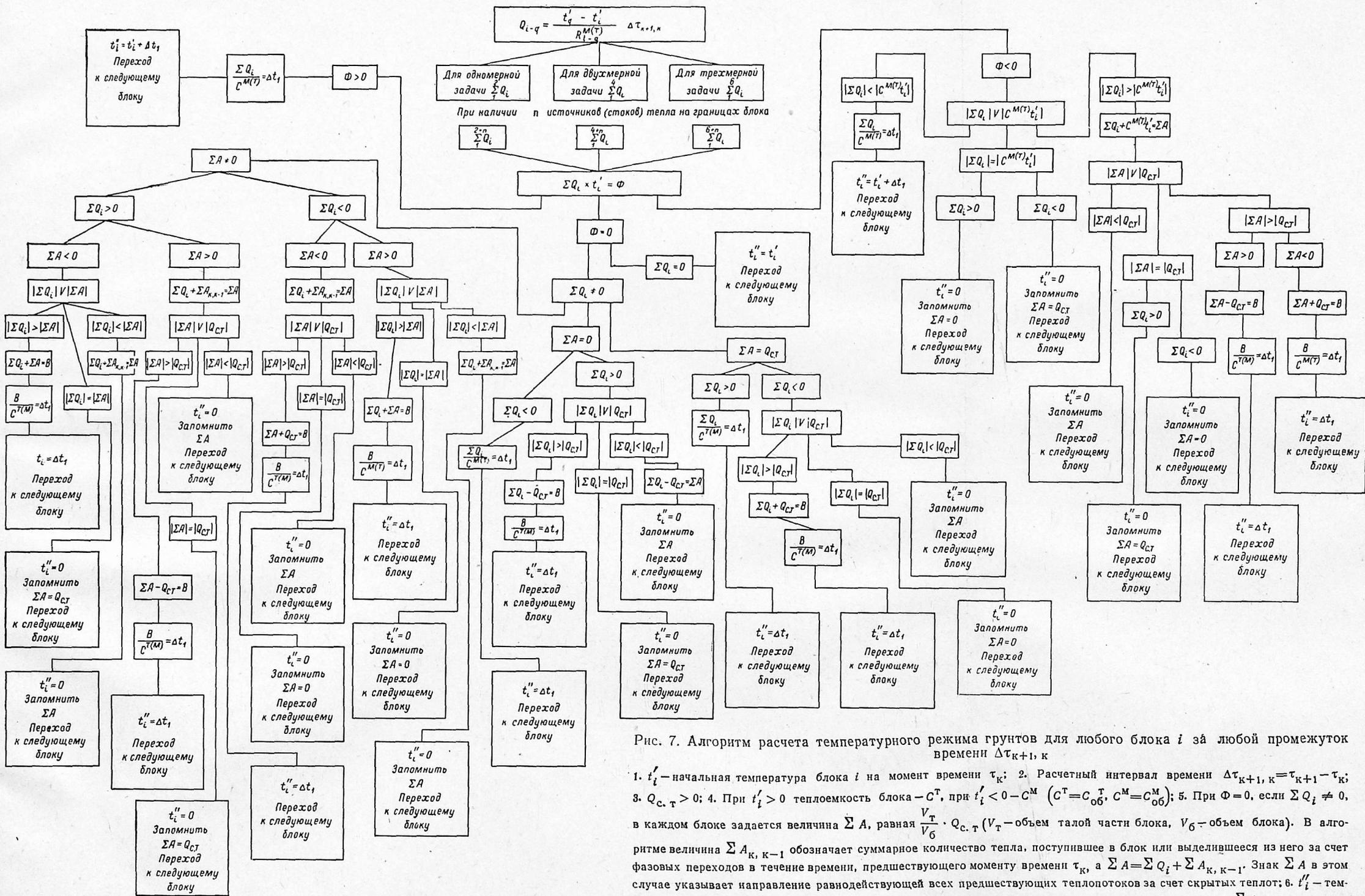


Рис. 7. Алгоритм расчета температурного режима грунтов для любого блока i за любой промежуток времени $\Delta \tau_{k+1, k}$

1. t'_i — начальная температура блока i на момент времени τ_k ; 2. Расчетный интервал времени $\Delta \tau_{k+1, k} = \tau_{k+1} - \tau_k$; 3. $Q_{c, \tau} > 0$; 4. При $t'_i > 0$ теплоемкость блока — C^T , при $t'_i < 0 - C^M$ ($C^T = C_{об}^T$, $C^M = C_{об}^M$); 5. При $\Phi = 0$, если $\Sigma Q_i \neq 0$, в каждом блоке задается величина ΣA , равная $\frac{V_T}{V_B} \cdot Q_{c, \tau}$ (V_T — объем талой части блока, V_B — объем блока). В алгоритме величина $\Sigma A_{k, k-1}$ обозначает суммарное количество тепла, поступившее в блок или выделившееся из него за счет фазовых переходов в течение времени, предшествующего моменту времени τ_k , а $\Sigma A = \Sigma Q_i + \Sigma A_{k, k-1}$. Знак ΣA в этом случае указывает направление равнодействующей всех предшествующих теплотоков за счет скрытых теплот; 6. t''_i — температура блока на момент времени τ_{k+1} ; 7. Для каждого блока печатать $t''_i \neq 0$, а при $t''_i = 0$ печатать $\frac{\Sigma A}{Q_{c, \tau}}$ со знаком ΣA .

Помимо граничных условий, на поверхности грунта задается величина изоляции поверхности за счет снежного покрова. Изоляция эта вводится в виде термических сопротивлений на поверхности грунта, добавляемых к термическим сопротивлениям в верхних частях пограничных блоков (см. рис. 8), и учитывается в течение времени ее нахождения на поверхности грунта. Снег, например, учитывается по средним датам установления и схода снежного покрова (по данным соответствующей метеостанции). На каждую декаду зимы рассчитывается свое значение термического сопротивления снега $R_{сн}$ в зависимости от ежедекадного изменения его мощности $l_{сн}$ и коэффициента теплопроводности $\lambda_{сн}$:

$$R_{сн} = \frac{l_{сн}}{\lambda_{сн} F}, \quad (44)$$

где F — площадь поперечного сечения соответствующего пограничного блока (в плоскости поверхности грунта).

Коэффициент теплопроводности снега удобно определять по эмпирической формуле

$$\lambda_{сн} = 0,018 + 0,87\gamma_{сн}, \quad (45)$$

где $\gamma_{сн}$ — плотность снежного покрова в $т/м^3$ ($\lambda_{сн}$ получается в $ккал/м^2 \cdot ч \cdot град$).

Вводится также на верхней границе для всех без исключения участков ее поверхности, включая и вертикальные стенки уступов, выступов и выемок, термическое сопротивление теплоотдаче с поверхности грунта

$$R_{\alpha} = \frac{l}{\alpha} \cdot \frac{1}{F}, \quad (46)$$

где F — площадь поперечного сечения поверхности, с которой происходит теплоотдача (верхняя или боковая границы блока).

Всякая другая изоляция также учитывается величиной термического сопротивления

$$R_{из} = \frac{l_{из}}{\lambda_{из}} \cdot \frac{1}{F}, \quad (47)$$

где $l_{из}$ — мощность изоляции;

$\lambda_{из}$ — коэффициент теплопроводности изоляции.

Таким образом, общее термическое сопротивление на поверхности грунта $R_{п}$ будет равно:

$$R_{п} = R_{сн} + R_{\alpha} + \sum_1^n R_{из}. \quad (48)$$

Необходимо помнить, что $R_{п}$ является в общем случае переменной величиной, которая должна рассчитываться на каждую декаду года.

Если теплоизоляция поверхности учитывается введением термических сопротивлений, то теплоемкость изоляции не учитывается и не рассчитывается ее температура. В некоторых случаях изоляция может быть влажной, достаточно объемной и плотной (например, теплоизолирующая отсыпка), и тогда целесообразно вводить ее в область исследований в виде одного или нескольких (в зависимости от ее размеров) блоков, рассчитывая теплообмен в этих блоках совместно с теплообменом всей области, а на ее поверхности учитывать существующую изоляцию обычным путем.

При назначении температур воздуха, как уже отмечалось, задается их годовой ход на основании среднедекадных значений температур, вычисленных по многолетним данным. При таком способе задания граничных условий мы будем получать при расчете температурный режим грунта в зависимости от средних климатических условий. Однако в некоторых случаях целесообразнее учитывать тенденцию изменения климатических условий или же брать за основу более суровые в климатическом отношении годы.

Таким образом, в большинстве случаев на верхней границе области допускается существование периодически изменяющейся температуры воздуха (с периодом, равным 1 году), что позволяет, имея годовой ход температуры, производить расчет на любое время. В случаях, когда учитывается тенденция изменения климатических условий, ход температуры воздуха следует задавать отдельно для каждого года расчета.

Боковые границы области исследований и граничные условия на этих границах назначаются иным образом. Любая боковая граница представляет собой вертикальную (обычно) плоскость в массиве грунта. Боковая граница должна отстоять от здания или сооружения на расстоянии, гарантирующем отсутствие их теплового влияния на этой границе, т. е. практически на боковых границах должен наблюдаться естественный температурный режим. Температуры на этой границе формируются так же, как и в массиве, т. е. подчиняясь соответствующим законам теплообмена, общим для всей области исследований. Чтобы их вычислить, т. е. определить их ход во времени на всей границе, необходимо решать специально задачу прогнозирования, по крайней мере одномерную, для естественных условий. Если же мы хотим определить точное минимальное расстояние от здания или сооружения, где перестает сказываться их влияние, то здесь необходимо решение уже двухмерной задачи с той же проблемой для этой вспомогательной задачи боковых граничных условий (т. е. задача становится неопределенной). Таким образом, выход — в решении одномерной задачи, вернее серии одномерных задач, по одной для каждой боковой границы.

Однако решение только одномерных задач для всех (от 2 до 4) боковых границ, если они выбраны по общим соображениям

о величинах зон теплового влияния в течение полного времени эксплуатации здания или сооружения, является достаточно трудоемким. Поэтому при назначении боковых границ и граничных условий поступают иначе. Известно, что жилые и общественные здания при обычных температурах в них оказывают влияние на температуру грунтов в плане на расстояние не более 10 м, а промышленные — с повышенным тепловыделением — не более 20 м. Поэтому боковые границы выбираются на расстояниях соответственно 10—15 и 20—25 м от ближайшего контура соответствующего здания или сооружения так, чтобы на поверхности условия теплообмена слева и справа от них и в разрезе по обе стороны грунты были бы примерно одинаковыми по составу и свойствам.

При соблюдении этого правила можно считать, что теплопоток через такую боковую границу будет крайне незначителен и его можно принять равным нулю постоянно. Следовательно, на боковых границах обычно задается граничное условие второго рода, т. е. теплоток через границу, величина которого принимается равной нулю ($q = 0$). Следует еще раз подчеркнуть необходимость того, чтобы при этом каждая боковая граница гарантированно находилась вне зон теплового влияния зданий и сооружений, т. к. если это правило не соблюдается, граница, на которой принято $q = \text{const}$ и $q = 0$, не будет пропускать тепло, идущее от здания или сооружения; в задаче, по сравнению с реальными условиями в области исследований, образуется излишек тепла и сформируются более высокие температуры.

Аналогичная проблема возникает и при определении положения нижней границы, на которой можно задать либо ее температуру, либо тепловой поток через нее, вычисленные по естественному геотермическому градиенту (соответственно граничные условия первого или второго рода).

Определяя положение нижней границы, следует учитывать, что основной теплообмен происходит в вертикальном направлении. Нижняя граница должна назначаться по крайней мере на уровне подошвы термоактивной зоны (с учетом теплового влияния здания или сооружения). Если назначить нижнюю границу в пределах этой зоны, то заданные граничные условия, являясь фактически зависимыми, в задаче опять-таки создадут своеобразный тепловой буфер. Практически установлено, что на нижней границе, отстоящей от поверхности области на 50—60 м, не ощущается влияния зданий и сооружений (кроме как от горячих производств). Граничные условия на нижней границе, назначенной на этой глубине, можно считать постоянными во времени.

Если задается граничное условие первого рода, то искомая температура $t_{н.г}$ рассчитывается от наиболее глубокой точки $Z_{изм}$, где имеются измеренные значения температуры $t_{изм}$ до за-

данной глубины $Z_{п.г}$ по геотермическому градиенту ΔT_1 , рассчитанному на 1 м:

$$t_{п.г} = t_{изм} + \Delta T_1 (Z_{п.г} - Z_{изм}). \quad (49)$$

Граничное условие второго рода задается на нижней границе теплопоток $q_{п.г}$ и рассчитывается по уравнению (24), где Δt — принимается равным 0°C , Δl — геотермической ступени, $\Delta \tau = 1$ ч, а расчет ведется для площади нижней поверхности каждого пограничного блока.

Величина R рассчитывается для слоя, мощность которого равна величине геометрической ступени, по коэффициенту теплопроводности соответствующего пограничного блока. Отсюда следует, что, являясь постоянной во времени, величина $q_{п.г}$ может быть неодинаковой для разных участков границы, если к ней примыкают различные грунты. Подсчитанная таким образом величина $q_{п.г}$ будет своего рода удельной величиной.

При разработке программы для машины вводится условие:

$$q_{п.г}^{\Sigma} = q_{п.г} \Delta \tau_{к+1,к} F_{\Sigma}, \quad (50)$$

где $q_{п.г}^{\Sigma}$ — величина теплового потока на всей нижней границе (или участке границы), площадь которой равна F_{Σ} (сумме площадей нижней поверхности всех или части блоков), а $\Delta \tau_{к+1,к}$ — величина расчетного шага времени (см. рис. 7).

Таким образом, граничные условия на всех границах задаются в окончательном виде непрерывными за все время расчета функциями так, чтобы можно было определить величину (и направление) соответствующего граничного условия в любой момент времени, соответствующий началу и концу τ_k и $\tau_{к+1}$ очередного расчетного интервала (шага) времени $\Delta \tau_{к+1,к}$ и определенный относительно момента начала расчета τ_0 . При задании граничного условия второго рода необходимо учитывать и величину площади, через которую происходит теплопоток.

Граничные условия задаются или синусоидой, или кусочно-линейно, или константой. Одновременно с граничными условиями на верхней границе задаются во времени величины термического сопротивления изоляции поверхности.

Источники или стоки тепла могут существовать не только на верхней границе, но и внутри области исследований (трубы, кабели и т. п.). Граничные условия за счет этих источников назначаются также независимо от температурного режима грунта и также в течение всего времени расчета задачи. Поток тепла между соответствующими источниками или стоками тепла и центрами соседних блоков рассчитывается по первому уравнению алгоритма, изображенного на рис. 7, причем температура источников (или стоков) или теплопоток изменяются по заданному закону, а температура в блоках рассчитывается в соответствии с алгоритмом,

Область исследований разбивается на блоки после определения положения ее границ. Обычно она разбивается прямоугольной сеткой, но размеры блоков могут быть различными. При этом соблюдается лишь условие, чтобы в каждом вертикальном или горизонтальном ряду размеры всех блоков соответственно оставались постоянными по горизонтали или по вертикали. В соседних рядах эти размеры могут отличаться.

При разбивке области следует иметь в виду, что чем больше блоков в ограниченной области и чем меньше их размеры, тем точнее решение при прочих равных условиях. Кроме того, поскольку реальные грунты неоднородны, большее количество блоков при меньших их размерах позволяет учесть в расчете больше различных неоднородностей. Эти обстоятельства вынуждают при разбивке области назначать в целом блоки достаточно незначительных размеров.

Однако разные части области исследований подвергаются тепловым воздействиям различной интенсивности. В верхних горизонтах грунта изменения температуры наиболее динамичны. У нижней границы теплообмен значительно меньше, и, кроме того, фазовых превращений в этой зоне практически не бывает. Свои особенности в этом смысле имеются и в зонах, прилегающих к боковым границам области. Поскольку погрешности решения уменьшаются при уменьшении интенсивности теплообмена, становится целесообразным дифференцированный подход к назначению размеров блоков в области исследований. При этом имеют значение размеры блоков по направлению теплового потока.

В одномерных задачах, где тепловой поток вертикален, имеют значение только размеры блоков по вертикали. В горизонтальном направлении размер блоков может быть любым. Практически в этих случаях рассматривается только вертикальный ряд блоков, размеры которых по горизонтали принимаются равными 1 м. Вертикально вниз по разрезу размеры блоков увеличиваются.

В двухмерных и трехмерных задачах, где на верхней границе области, а иногда и внутри нее имеются источники и стоки тепла за счет зданий и сооружений, картина теплообмена несколько иная. Он наиболее интенсивен в центральной части области исследований, уменьшаясь по направлению к нижней ее части и нижним частям боковых границ. В центральной части теплообмен достаточно интенсивен во всех направлениях. При движении вниз начинает преобладать вертикальная составляющая теплового потока. В верхних частях боковых зон при движении к границам превалирует вертикальная составляющая теплового потока, тогда как горизонтальная составляющая в боковых пограничных блоках уменьшается до нуля.

Учитывая это, размеры блоков должны быть наименьшими в середине центральной части области как по горизонтали, так

и по вертикали, в верхней части боковых зон — наименьшими по вертикали, а в нижней половине области размеры блоков можно увеличить как по горизонтали, так и по вертикали.

Так как теплообмен между соседними блоками происходит через их поверхности, прилегающие друг к другу, размеры этих поверхностей (для облегчения расчетов) должны совпадать. Отсюда следует, что область разбивается на блоки системой вертикальных и горизонтальных плоскостей, каждая из которых сечет всю область. Расстояния между соседними параллельными плоскостями могут быть произвольными. Такая система разбивки, исходя только из соображения ее целесообразности, несколько ограничивает возможности выделения размеров блоков.

Поскольку время счета на ЭЦВМ зависит в этой задаче в основном от количества блоков, приходится уменьшать их количество (увеличивая их размеры в наименее динамических зонах области исследований).

При разбивке области исследований должно выполняться также условие однородности грунта в пределах каждого выделенного блока. Грунты считаются однородными, если соблюдено единство следующих характеристик: состава; теплопроводности в талом состоянии λ_T ; теплопроводности в мерзлом состоянии λ_M ; удельной теплоемкости грунта $C_{ск}$; суммарной весовой влажности $W_{вес}$; относительной льдистости грунта i ; объемного веса скелета грунта $\gamma_{ск}$.

Разновидности грунтов в пределах литологических разностей выделяются по условию неравенства хотя бы одного из приведенных свойств грунта. Даже при самой детальной разбивке на блоки такое выделение грунтовых разновидностей всегда будет несколько схематизированным, что создает некоторые издержки при переходе от области с непрерывно распределенными свойствами к дискретной области. Надо также сказать, что в тех зонах, где теплообмен невелик, эта схематизация не связана с появлением сколько-нибудь значительных погрешностей при расчете температурного режима грунта.

При разбивке области каждая грунтовая разность обычно занимает некоторое количество блоков. Зоны блоков с различными разностями нумеруются по порядку.

Вертикальные размеры блоков до глубины 4—6 м обычно составляют 0,5—1 м, так же как и горизонтальные размеры в зонах по обе стороны от границ здания или сооружения. В средней части области размеры блоков по вертикали должны быть порядка 1—2 м до глубины 20—25 м, а глубже — 4—6—8 м. В боковых частях области у ее границ размеры блоков по горизонтали могут быть 1—2—3 м.

После разбивки области на блоки в каждой из них задаются начальные условия, т. е. температуры грунта, соответствующие моменту начала расчета (T_0 , t_0). Эти температуры назначаются

в центрах блоков. Сказанное относится также и к любым температурным полям (T_1, T_2, \dots, T_n), полученным в процессе расчета. Начальные условия задаются по данным термокаротажных работ. Считается, что начальная температура в области исследований изменяется только по глубине, и поэтому начальные условия в каждом горизонтальном ряду блоков принимаются одинаковыми. Началу расчета соответствует естественное распределение температуры в грунтах.

В тех случаях, когда расчет начинается при наличии на верхней границе области или внутри ее источников (стоков) тепла, действовавших до начала расчета, начальные условия должны задаваться в соответствии со сформировавшимися в результате влияния этих источников температурами грунта. Однако такие случаи при прогнозировании бывают крайне редко. Поскольку глубины термокаротажа обычно меньше глубины, на которой располагается нижняя граница области, то в зоне между забоем наиболее глубокой скважины, в которой производился термокартаж, и нижней границей области начальные условия на каждой глубине рассчитываются по геотермическому градиенту с помощью формулы (49). В этом случае в (49) вместо $t_{н.г}$ рассчитывается температура t_{z_i} на любой глубине Z_i .

Выше отмечалось, что начальная температура в области по горизонтали принимается одинаковой. Если в этом направлении существует значительная неоднородность грунтов, то заданные начальные условия будут несколько отличаться от реального распределения температур (так же как и в случаях действующих до начала расчета источников или стоков тепла, если они не учтены при задании T_0). Однако если граничные условия заданы правильно, то некоторая неточность в задании начальных условий не имеет особого значения, поскольку в процессе расчета температурный режим грунтов приходит в соответствие с действующими граничными условиями и распределением свойств грунтов в области. При назначении начальных условий особое внимание следует обращать на то, чтобы они не имели существенных разрывов с граничными условиями на верхней границе, т. е. начальные условия должны соответствовать времени начала расчета.

Если время термокаротажа не совпадает с временем начала расчета, то начальные условия в верхней зоне области можно назначать, принимая температуру на подошве слоя сезонного оттаивания (промерзания) в момент начала расчета за 0°C , а выше этой подошвы на любой глубине Z_i по формуле

$$t'_{z_i} = \frac{Z_i t_B}{Z_{\tau_0}}, \quad (51)$$

где Z_{τ_0} — глубина сезонного оттаивания или промерзания в момент начала расчета τ_0 .

Для каждого блока назначаются и рассчитываются следующие параметры:

- $\gamma_{ск}$ — объемный вес скелета грунта в $кг/м^3$;
 $W_{вес}$ — суммарная весовая влажность грунта в %;
 $C_{ск}$ — удельная теплоемкость скелета грунта в $ккал/кг \times \times град$;
 λ_T — коэффициент теплопроводности грунта в талом состоянии в $ккал/м \cdot ч \cdot град$;
 λ_M — коэффициент теплопроводности грунта в мерзлом состоянии в $ккал/м \cdot ч \cdot град$;
 i — относительная льдистость при наиболее низких отрицательных температурах, принимаемых грунтом в естественных условиях в %/100;
 $C_{об}^T$ — объемная теплоемкость грунта в талом состоянии в $ккал/м^3 \cdot град$;
 $C_{об}^M$ — объемная теплоемкость грунта в мерзлом состоянии в $ккал/м^3 \cdot град$;
 $Q_{с.т}$ — скрытая теплота плавления льда в $ккал/м^3$.

Величины $\gamma_{ск}$, $W_{вес}$, i определяются лабораторным путем. Величины $C_{ск}$, λ_T , λ_M при отсутствии лабораторных данных можно принимать по СНиП II-Б. 6—66.

$$C_{об}^T = \left(\gamma_{ск} C_{ск} + \gamma_{ск} \frac{W_{вес}}{100} \right) V_6; \quad (52)$$

$$C_{об}^M = \left[\gamma_{ск} C_{ск} + \gamma_{ск} \frac{W_{вес}}{100} (1 - i) + \gamma_{ск} \frac{W_{вес}}{100} \cdot i \cdot 0,5 \right] V_6, \quad (53)$$

где V_6 — объем соответствующего блока.

С учетом множителя V_6 по формуле (27) определяется $Q_{с.т}$.

Величину относительной льдистости i можно определять из соотношения

$$i = 1 - \frac{W_n}{W_{вес}}, \quad (54)$$

где W_n — количество незамерзшей воды в %/100.

$$W_n = K_n W_p, \quad (55)$$

где W_p — влажность грунта на границе раскатывания в %/100;

K_n — определяется по табл. 1 СНиП II-Б. 6—66.

Между центрами всех соседних блоков рассчитываются величины термических сопротивлений R по формуле (25) для талого и мерзлого состояния грунтов, т. е., например, термическое сопротивление между блоками m и n будет равно:

$$R_{m-n}^T = \frac{l_{m-n}}{\lambda_{m-n}^T F} \quad (56)$$

при условии, что блоки m и n состоят из одинаковых грунтовых разностей. В противном же случае

$$R_{m-n}^T = \left(\frac{l_m}{\lambda_m^T} + \frac{l_n}{\lambda_n^T} \right) \frac{1}{F}. \quad (57)$$

Для мерзлых грунтов формулы соответственно будут выглядеть:

$$R_{m-n}^M = \frac{l_{m-n}}{\lambda_{m-n}^M F}; \quad (58)$$

$$R_{m-n}^M = \left(\frac{l_m}{\lambda_m^M} + \frac{l_n}{\lambda_n^M} \right) \frac{1}{F}. \quad (59)$$

В соотношениях (56) и (58) величина l_{m-n} представляет собой расстояние между центрами соответствующих блоков, а в соотношениях (57) и (59) l_m и l_n — расстояние от центров соответствующих блоков до их границ по прямой, соединяющей центры этих блоков, т. е.

$$l_m + l_n = l_{m-n}.$$

Кроме R_{m-n}^T и R_{m-n}^M рассчитываются смешанные сопротивления $R_{m-n}^{T,M}$ и $R_{m-n}^{M,T}$ для тех случаев, когда один из блоков по линии $m-n$ является мерзлым, а другой — талым.

$$R_{m-n}^{T,M} = \left(\frac{l_m^T}{\lambda_m^T} + \frac{l_n^M}{\lambda_n^M} \right) \frac{1}{F}; \quad (60)$$

$$R_{m-n}^{M,T} = \left(\frac{l_m^M}{\lambda_m^M} + \frac{l_n^T}{\lambda_n^T} \right) \frac{1}{F}. \quad (61)$$

Если по линии, соединяющей центры блоков $m-n$, часть одного из блоков (в интервале между центрами) находится в мерзлом (талом) состоянии, а другая в талом (мерзлом) состоянии, то

$$R_{m-n}^{M,T(T,M)} = \left(\frac{l_m^{(T)}}{\lambda_m^{(T)}} + \frac{l_m^{(M)}}{\lambda_m^{(M)}} + \frac{l_n^{(M)}}{\lambda_n^{(M)}} \right) \frac{1}{F}, \quad (62)$$

где $l_m^{(T)}$ — расстояние в блоке m по линии $m-n$ от центра блока до границы нулевой температуры;

$l_m^{(M)}$ — расстояние в блоке m по линии $m-n$ от границы нулевой температуры до границы блока m с блоком n .

Аналогичные сопротивления подсчитываются для пограничных блоков по линии, соединяющей их центры с соответствующей границей.

Талый и мерзлый грунты могут находиться в блоке одновременно, если в нем в каком-то интервале времени существует нулевая температура. Граница между ними проводится не по центру блока, а вычисляется из соотношения

$$V_T = \frac{\sum A}{Q_{с.т}} V_6, \quad (63)$$

где V_T — объем талой части блока в m^3 ;

$$\sum A = \sum Q_i + \sum A_{к, к-1}, \quad (64)$$

где $\sum Q_i$ — количество тепла, поступившее в блок или выделившееся из него в интервале времени $\Delta\tau_{к+1, к}$ (при температуре блока $0^\circ C$);

$\sum A_{к, к-1}$ — суммарное количество тепла, поступившее в блок или выделившееся из него за счет фазовых переходов (т. е. при $0^\circ C$) за все время, предшествующее моменту времени τ_k .

Алгоритм расчета (рис. 7) предусматривает вычисление величины $\frac{\sum A}{Q_{с.т}}$ для каждого блока, если его температура равна $0^\circ C$, в конце каждого расчетного интервала времени. По полученному значению V_T определяется положение нулевой границы.

В некоторых случаях для более детального вычисления термических сопротивлений и положения нулевой границы целесообразно подсчитывать не только суммарное значение $\sum A$, но и дополнительно аналогичные величины отдельно для верхней и боковых граней некоторых блоков, если есть основания предполагать возможность интенсивных теплотоков через боковые грани. Указанное условие запоминания и суммирования весьма легко присоединить к алгоритму после его уравнения (1) на рис. 7, поскольку теплоток вычисляются все равно для каждой грани.

При этом следует дополнительно указать, что печатается при $t_i = 0$ (см. рис. 7) не только $\frac{\sum A}{Q_{с.т}}$, но и $\frac{\sum A_{гр}}{\sum A}$ или $\frac{\sum A_{гр}}{Q_{с.т}}$ для каждой грани ($\sum A_{гр}$ — часть $\sum A$ для соответствующей грани).

После выполнения всех условий, указанных в настоящем разделе, задача готова к расчету, который заключается в последовательном вычислении температур (и при $0^\circ C$ величин

$\frac{\sum A}{Q_{с.т}}$) для каждого блока области исследований на конец каждого расчетного интервала времени $\Delta\tau_{к+1, к}$. После этого вновь повторяется цикл расчетов для интервала времени $\Delta\tau_{к+2, к+1}$ и так далее до заданного конечного момента τ_n .

Следует напомнить, что граничные условия должны быть заданы как функция времени непрерывно на каждой границе.

§ 7. НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МЕРЗЛОТНЫХ УСЛОВИЙ

В прогнозировании ИГМ условий ведущее место занимает прогнозирование температурного режима вечномёрзлых грунтов в условиях строительства и эксплуатации проектируемых зданий и сооружений. В настоящей работе были определены задачи прогнозирования при изысканиях для каждой стадии проектирования и показаны методы решения этих задач, отвечающие потребностям проектирования оснований и фундаментов. Опыт показывает, что применение этих методов в практике проектно-изыскательских работ дает вполне удовлетворительные результаты.

Однако теоретически многие вопросы прогнозирования температурного режима грунтов разработаны еще недостаточно. Это касается, в первую очередь, оценки точности расчета температурного режима грунтов в целом и его составляющих, поскольку существующие методы расчета инженерных задач являются приближенными.

Не разработано само понятие точности того или иного метода решения уравнения нестационарной теплопроводности, т. е. понятие ошибки, возникающей при решении. Ошибка при решении возникает за счет приближенности метода решения и за счет неизбежной схематизации реальных условий в принятой для исследования модели грунта. Эта схематизация обусловлена, во-первых, допущениями о закономерностях теплообмена в грунтах, а во-вторых, недостаточной степенью точности определения исходных данных для расчета. Сюда же в принципе следует включить и ошибку, возникающую за счет также неизбежной схематизации граничных условий, потому что некоторые природные факторы с трудом поддаются количественному учету.

Однако если принять, что уровни схематизации модели грунта и граничных условий стандартны во всех случаях, то общая ошибка будет характеризовать метод решения. По-видимому, ошибку любого решения можно оценить по величине разности между рассчитанными значениями искомой величины и ее истинными значениями. Обычно точность решения оценивается величиной его относительной ошибки.

При расчетах температурного режима грунта численными методами, т. е. тем способом, который в настоящее время представляется наиболее приемлемым для решения большинства инженерных задач, величина ошибки зависит от интенсивности теплообмена в грунтах при прочих равных условиях.

В зонах области, где не происходит промерзания или оттаивания, различные абсолютные ошибки, по-видимому, могут оцениваться единственной величиной относительной ошибки. В тех зонах, где грунт промерзает или оттаивает, относительные ошибки могут быть различными. В разных задачах, в зависимости

от их конкретных условий также следует ожидать различной величины относительных ошибок в пределах одного и того же метода решения. Поэтому сопоставление расчетного температурного режима для какого-либо конкретного случая и данных натурных наблюдений позволит оценить ошибки лишь для данного случая. Отсюда возникает проблема получения эталонных температур для сравнения с расчетными.

Один из путей решения этой проблемы представляется в разработке классификации прогнозных задач, характеризующихся различными градациями вероятных величин относительных ошибок, и натурной проверки результатов расчета для каждой группы задач. Более доступен путь получения эталонных решений, принимаемых по тем или иным соображениям за истинные. Однако сложности в определении ошибок этим не исчерпываются.

При проектировании оснований и фундаментов ошибки определения температурного режима в разных зонах области исследований имеют различное значение. Например, менее существенны ошибки в пределах слоя сезонного оттаивания или промерзания и очень важны их величины в активной зоне. Так, ошибка порядка 1°C в верхних горизонтах области в целом вполне допустима, т. к. глубина сезонного промерзания или оттаивания за счет этого исказится не более чем на 5—10 см. Такая же ошибка в пределах активной зоны приведет к грубым ошибкам в назначении прочностных и деформационных характеристик грунтов.

Все это приводит к тому, что тот или иной метод прогнозирования температурного режима грунтов не может характеризоваться единственной ошибкой. Нельзя также говорить о максимальной или минимальной величине такой ошибки. Решение следует оценивать величиной максимальной ошибки в различных точках области исследований. Учитывая, что тепловые воздействия на область в разных задачах неодинаковы, нельзя заранее в общем случае определить эти характеристические точки в области исследований. Они могут быть заранее определены лишь для различных типов прогнозных задач, которые классифицируются по интенсивности теплообмена на границах области.

Одним из недостаточно разработанных вопросов прогнозирования является вопрос о допустимой степени схематизации реальных условий в различных конкретных случаях. С одной стороны, требуется оценка влияния того или иного уровня схематизации на точность получаемых решений, а с другой — необходима оценка требуемой точности определения тех или иных прогнозируемых параметров в зависимости от характеристики зданий и сооружений. Только таким путем можно определить оптимальные методы прогнозирования ИГМ условий на строгой основе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аветикян Ю. А. Исследования вечномерзлых грунтов методом малоглубинного частотного зондирования. — В сб.: «Инженерные изыскания в строительстве», № 4 (7). М., изд. ЦИНИС, 1970.

2. Акимов А. Г. Опыт применения акустических и сейсмических методов исследований мерзлых горных пород. — В сб.: «Современные вопросы региональной и инженерной геокриологии (мерзлотоведения). М., «Наука», 1964.

3. Будаков Б. М., Васильев Ф. П., Успенский А. Б. Разностный метод решения некоторых краевых задач типа Стефана. — В кн.: «Численные методы в газовой динамике» (сб. работ ВЦ МГУ; вып. IV). М., Изд-во МГУ, 1965.

4. Будаков Б. М., Соловьева Е. Н., Успенский А. Б. Разностный метод со сглаживанием коэффициентов для решения задач Стефана. — «Журнал вычисл. математики и математ. физики», 1965, т. 5, № 5.

5. Ваничев А. П. Приближенный метод решения задач теплопроводности при переменных константах. — Изв. АН СССР, отд. техн. наук, 1946, № 12.

6. Викторов С. В., Востокова Е. А., Вышивкин Д. Д. Введение в индикационную геоботанику. М., Изд-во МГУ, 1962.

7. Востокова Е. А. Вопросы индикационной геоботаники. М., Изд. Моск. общ-ва испытателей природы (МОИП), 1960.

8. Геокриологические условия Западно-Сибирской низменности. М., «Наука», 1967. Авт.: В. В. Баулин, Е. Б. Булопухова, Г. И. Дубиков, Л. М. Шмелев.

9. Достовалов Б. Н., Кудрявцев В. А. Общее мерзлотоведение. М., Изд-во МГУ, 1967.

10. Кириллов В. А. К вопросу о возможности определения нижней границы вечной мерзлоты методом ВЭЗ. — «Колыма», 1964, № 8.

11. Колесников А. Г., Мартынов Г. А. О расчете глубины промерзания и оттаивания грунтов. — «Материалы по лаб. исслед. мерзл. грунтов», Сб. 1. М., Изд-во АН СССР, 1953.

12. Кудрявцев В. А. Температура верхних горизонтов вечномерзлой толщи в пределах СССР. М., Изд-во АН СССР, 1954.

13. Левкович А. И. Выбор принципа использования вечномерзлых грунтов в качестве оснований при строительстве в Забайкалье. — В кн.: «Строительство зданий и сооружений на мерзлых грунтах» (Записки Забайкальского филиала Географ. общ-ва СССР, вып. XXIX). Чита, 1969.

14. Левкович А. И. О прогнозировании инженерно-геологических мерзлотных условий. — В сб. трудов 2-го республик. совещ. по производству инженерно-геологич. изысканий в районах распространения вечномерзлых грунтов. Т. I. М., Стройиздат, 1972.

15. Левкович А. И. Основные принципы производства инженерно-геологических изысканий в районах распространения вечномерзлых грунтов. — В сб. трудов 2-го республик. совещ. по производству инженерно-геологич. изысканий в районах распространения вечномерзлых грунтов. Т. I. М., Стройиздат, 1972.

16. Левкович А. И. Расчет прогноза изменения мерзлотных условий при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений с помощью элек-

гронных вычислительных машин. — В сб. трудов ин-та «Фундаментпроект», вып. 7. М., изд. ЦБТИ Минмонтажспецстроя, 1967.

17. Лейбензон Л. С. Руководство по нефтепромысловой механике. Застывание остановленного трубопровода. М. — Л., ОГИЗ, 1931.

18. Лукьянов В. С., Головкин М. Д. Расчет глубины промерзания грунтов. М., Трансжелдориздат, 1957. (Труды ВНИИ транспортного строительства, вып. 23).

19. Мазуров Г. П. Физико-механические свойства мерзлых грунтов. Л. — М., Стройиздат, 1964.

20. Меламед В. Г. Сведение задачи Стефана к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. — Изв. АН СССР, сер. геофизич., № 7, 1958.

21. Методика комплексной мерзлотно-геологической и инженерно-геологической съемки масштабов 1:200 000 и 1:500 000. М., изд. МГУ, 1970.

22. Методические указания по проведению ускоренной инженерно-геологической разведки (геофизическими методами и скоростным бурением). Сост. В. А. Шемшурин, Д. Н. Башкатов. М., 1966.

23. Общее мерзлотоведение. М. — Л., Изд-во АН СССР, 1940. Авт.: М. И. Сумгин, С. П. Качурин, Н. И. Толстихин, В. Ф. Тумель.

24. Основы геокриологии (мерзлотоведения). Ч. I и II. М., Изд-во АН СССР, 1959.

25. Палькин Ю. С. Применение АВМ и ЭЦВМ в исследованиях теплового состояния оснований зданий. — В кн.: «Проблемы строительства в условиях Забайкалья» (Записки Забайкальского филиала Географ. общ-ва СССР, вып. 44). Чита, 1970.

26. Полтев Н. Ф. Основы мерзлотной съемки (Избр. главы). Под ред. проф. В. А. Кудрявцева. М., Изд-во МГУ, 1963.

27. Попов А. И. Вечная мерзлота в Западной Сибири. М., Изд. АН СССР, 1953.

28. Порхаев Г. В. Тепловое взаимодействие зданий и сооружений с вечномерзлыми грунтами. М., «Наука», 1970.

29. Протасьева И. В. Аэрометоды в геокриологии. М., «Наука», 1967.

30. Прочность и ползуемость мерзлых грунтов и расчеты льдогрунтовых ограждений. М., Изд-во АН СССР, 1962. Авт.: С. С. Вялов, В. Г. Гмошинский, С. Э. Городецкий, В. Г. Григорьева, Ю. К. Зарецкий, Н. К. Пекарская, Е. П. Шушерина.

31. Рекомендации по прогнозированию температурного режима вечномерзлых грунтов оснований при инженерно-геологических изысканиях.

ИМД-01-72
ЦТИ СИЗ М., 1972.

32. Рубинштейн Л. И. О решении задачи Стефана. — Изв. АН СССР, сер. географ. и геофиз., 1947, т. XI, № 1.

33. Руководство по геологической документации при инженерных изысканиях для строительства. М., Стройиздат, 1969.

34. Руководство по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов. М., Стройиздат, 1973.

35. Словарь по гидрогеологии и инженерной геологии. М., «Недра», 1971.

36. Тезисы докладов Всесоюзного научного совещания по мерзлотоведению. М., Изд-во МГУ, 1970.

37. Теплофизика промерзающих и протаивающих грунтов. Гл. V. М., «Наука», 1964.

38. Указания по производству инженерно-геологических изысканий в районах распространения вечномерзлых грунтов. РСН 31-69. Изд. офиц. М., 1970.

39. Указания по производству инженерно-геологических изысканий для строительства магистральных трубопроводов в районах распространения вечномерзлых грунтов. РСН 36-70. Изд. офиц. М., 1970.

40. Указания по производству инженерно-геологических изысканий для строительства инженерных коммуникаций в районах распространения вечномерзлых грунтов. РСН 37-70. Изд. офиц. М., 1970.

41. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов (общая и прикладная). Учеб. пособие для инж.-строит. вузов. М., «Высшая школа», 1973.

42. Чарный И. А. О продвижении границы изменения агрегатного состояния при охлаждении или нагревании тел. — Изв. АН СССР, отд. техн. наук, 1948, № 2.

43. Шумский П. А. Основы структурного ледоведения. Петрография пресного льда как метод гляциологического исследования. М., Изд-во АН СССР, 1955.

44. Якупов В. С. Определение мощности современных рыхлых отложений методом ВЭЗ в районах с низкой температурой многолетнемерзлого слоя. М., Изд. АН СССР, 1959. [Труды Ин-та мерзлотоведения АН СССР, т. 15].

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ГЛАВА I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ	
§ 1. Краткие сведения о вечномерзлых грунтах	3
§ 2. Специфические особенности вечномерзлых грунтов и районов их распространения	11
§ 3. Задачи и последовательность выполнения изысканий для различных стадий проектирования	21
§ 4. Свойства грунтов, определяемые при изысканиях для различных стадий проектирования	28
§ 5. Требования к содержанию технических заданий на изыскания	31
ГЛАВА II. СОСТАВ И СОДЕРЖАНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ ДЛЯ ТЭО, ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТА И РАБОЧИХ ЧЕРТЕЖЕЙ	
§ 1. Принципы производства изысканий	34
§ 2. Инженерно-геологические мерзлотные условия, изучаемые на различных этапах изысканий	38
§ 3. Состав и содержание изысканий	43
ГЛАВА III. МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ РАБОТ	
§ 1. Мерзлотное обследование	65
§ 2. Буровые работы	73
§ 3. Проходка шурфов	76
§ 4. Термокаротажные работы	78
§ 5. Определение обобщенных характеристик температурного режима грунтов	81
§ 6. Опытные полевые работы	95
§ 7. Геофизические работы	101
ГЛАВА IV. МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ	
§ 1. Закономерности теплообмена в вечномерзлых грунтах	106
§ 2. Характеристики температурного режима вечномерзлых грунтов, необходимые для проектирования оснований и фундаментов	113
§ 3. Постановка задачи о прогнозировании температурного режима грунтов	115
§ 4. Приближенные аналитические методы расчета составляющих температурного режима грунтов	117
§ 5. Численные методы расчета температурных полей в грунтах с использованием ЭЦВМ	119
§ 6. Подготовка задачи о прогнозировании к расчету	123
§ 7. Некоторые проблемы прогнозирования инженерно-геологических мерзлотных условий	139
Литература	141

51 коп.

25076

44

22842