МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Кафедра механики многофазных систем

РЕКОМЕНДОВАНО К ЗАЩИТЕ
В ГЭК И ПРОВЕРЕНО НА ОБЪЕМ
ЗАИМСТВОВАНИЯ
И.о. заведующего кафедрой
к.ф.-м.н.
_____ П.Ю. Михайлов
16.06. 2017 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

РАЗРАБОТКА БЕСКОНТАКТНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПРОМЕРЗАНИЯ ВЛАЖНОГО ГРУНТА

03.04.02 Физика
Магистерская программа «Техническая физика в нефтегазовых технологиях»

Выполнил работу
Студент 2 курса
очной
формы обучения

Лим
Сергей
Игоревич

Научный руководитель
к.т.н., доцент

Григорьев
Борис
Владимирович

Рецензент
к.т.н., научный сотрудник
ТюмСЦ СО РАН

Спасенникова
Клавдия
Анатольевна

г. Тюмень, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

АНОТАЦИЯ 3
ВВЕДЕНИЕ 4
1. МЕРЗЛЫЕ ГРУНТЫ 6
1.1. Основные компоненты мерзлых грунтов 6
1.1.1. Твердые минеральные частицы 6
1.1.2. Лед 7
1.1.3. Вода в жидкой фазе 9
1.1.4. Газообразные компоненты 10
1.2. Свойства мерзлых грунтов 11
1.2.1. Физические свойства 11
1.2.2. Теплофизические свойства 17
1.2.3. Механические свойства 21
1.2.4. Реологические свойства 27
1.3 Выводы по главе 1 30
2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТА 31
2.1. Обзор методов 31
2.2. Метод непосредственных измерений 33
2.3. Температурный метод 34
2.4. Метод измерения мерзлотомерами 34
2.5. Расчетный метод определения сезонной глубины промерзания грунта 41
Выводы по главе 2 43
3. ПРИНЦИПЫ БЕСКОНТАКТНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТА 44
3.1 Ультразвуковые методы изучения акустических свойств горных пород 44
3.2 Идея эксперимента по определению глубины промерзания грунта. 47
3.3 Описание экспериментальной установки 49
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ 53
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 57

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ 59

АНОТАЦИЯ

Определение глубины промерзания грунта является одной из первостепенных задач на стадии проектирования различного рода строительных сооружений на мерзлом и вечномерзлом грунте. В настоящее время не существует метода неразрушающего контроля для определения этой важнейшей характеристики.

В первых главах данной работы представлен литературный обзор по характеристикам мерзлых грунтов, рассмотрены существующие методы определения глубины промерзания грунта.

В заключительных главах работы автором предложен принципиально новый метод определения глубины промерзания грунта, описаны экспериментальная установка и проведенный на ней эксперимент.

ВВЕДЕНИЕ

Практически вся территория России в течение года подвергается влиянию отрицательных температур. На одних территориях это влияние имеет сезонный характер, а на некоторых постоянный. Строительные нормы и правила по возведению конструкций на вечномерзлых грунтах рассчитаны на условие существования грунта в мерзлом виде, вне зависимости от сезона года и внешних условий, в противном случае нарушается целостность сооружений в виду слабой несущей способности этих грунтов в талом состоянии.

Процесс перехода воды в твердое состояние и обратно при промерзании и оттаивании грунта несет существенные изменения в такие свойства грунтов, как водопроницаемость, прочность и склонность к деформациям, а также влияет на их тепловые и электрические характеристики. Промерзание приводит к нескольким мерзлотным процессам. Наблюдается изменение строения породы, выражающееся в различиях структуры и текстуры, вследствие морозного пучения, образования морознобойных трещин и перераспределения влаги в грунте.

Инженерно-геологические изыскания показали, что даже незначительные колебания температуры вносят значительное влияние на свойства грунта, так как лед является крайне неустойчивой фазой. Такие колебания температуры могут привести к изменению физического состояния грунта и повлечь за собой оползни и термокарстовые явления, резкие просадки грунта, что является причиной критических последствий для строительных сооружений, таких как деформация и полное разрушение.

Из всего сказанного можно сделать вывод, что глубина промерзания грунта является одной из важнейших характеристик, которую нужно учитывать при строительстве различного рода сооружений.

1. МЕРЗЛЫЕ ГРУНТЫ

1.1. Основные компоненты мерзлых грунтов

1.1.1. Твердые минеральные частицы

К основным компонентам мерзлых грунтов относятся твердые минеральные частицы, твердые кристаллы льда, незамерзшую свободную и связанную воду в жидком состоянии и газообразные компоненты (водяной пар и газы).

Состав твердых минеральных частиц значительно влияет на свойства мерзлого грунта, зависящие в свою очередь от размеров и формы частиц, от физико-химической природы их поверхности, которая в основном определяется составом минеральных частиц.

Классификация мерзлых грунтов по их гранулометрическому, т.е. зерновому, составу не отличается от классификации немерзлых грунтов. Таким образом выделяют крупнообломочные, песчаные и глинистые грунты.

Однако, важно заметить, что на свойства мерзлого грунта помимо размеров минеральных зерен, внушительное влияние оказывает их форма. От формы частиц зависит величина местных усилий, идущих от внешней нагрузки. Н.А. Цитович в своей книге “Механика мерзлых грунтов” отмечает, что при плоской форме минеральных частиц, которая нередко наблюдается у слюдитсых песков, внешнее давление в точках контакта частиц почти не трансформируется, в то время как при остроугольной форме, свойственной горным пескам, оно может достигать очень большой величины.

Появление существенных давлений между льдом и минеральными частицами в точках контакта между частицами может привести к значимым изменениям в свойствах мерзлого грунта, например в содержании в них незамёрзшей воды, изменению их структуры, увеличению сил трения между частицами, что приводит к возрастанию их сопротивлению сдвига.

На свойства мерзлых грунтов влияет еще и дисперность твердых минеральных частиц. В основном влияние сказывается в направлении протекания

в них физико-химических поверхностных явлений, интенсивность которых определяется удельной поверхностью частиц, которая зависит от минералогического состава грунтов. Какие-то минералы, такие как полевой шпат, кварц, взаимодействуют с поровой водой менее активно, какие-то - значительно сильнее, к ним можно отнести монтмориллонит, оттапульгит и др. При этом меняется не только скорость, но и характер их взаимодействия, потому что от неоднородности поверхности и минералогического состава зависит число центров взаимодействия их с окружающей средой.

1.1.2. Лед

Лед, находящийся в мерзлом грунте и являющийся его обязательной составляющей, представленный в виде мономинеральной криогидратной породе, имеет физико-химические свойства, сильно отличающиеся от свойств других горных пород. Под льдом подразумевают все твердые состояния воды вне зависимости от модификации (кристаллической или аморфной).

Из монографии Н.А.Цытовича “Механика мерзлых грунтов”: выделяют одну аморфную модификацию льда (возникающую при быстром, очень низком - глубоком замораживании), три кристаллические модификации (I, II, III), которые существуют при отрицательных температурах и находятся под соответствующим давлением, и модификации льда (кристаллической воды), образующиеся под давлениями в десятки тысяч атмосфер, которые могут существовать еще и при положительных температурах.

В книге Б.В.Вайнберга “Лед” говорится, что при понижении температуры льда и повышении давления до 2200 ат, обычный кристаллический лед I переходит в лед II (который тяжелее воды), а при достижении давления в 2236 ат и температуре льда порядка -34, -64 °С переходит в лед III. Данные переходы сопровождаются резким изменением объема и поглощением огромного количества теплоты.

Самая распространенная модификация льда, обычный лед I существует при нормальных давлениях и не очень низких температурах, не опускающихся ниже -

100 °С. Лед I это важнейшая составляющая мерзлых грунтов, своеобразные свойства которой в основном и определяют механические свойства мерзлых грунтов.

Кристаллическая структура льда I представляет из себя гексагональную систему, они обладают ярко выраженной анизотропией механических свойств: наблюдается наибольшая вязко-пластичная деформация по линии, перпендикулярной направлению главной оптической оси. В параллельном направлении напротив реологические свойства во льду настолько несущественны , что упругие деформации влекут за собой хрупкое разрушение.

Находясь под нагрузкой, даже при небольших напряжениях, будет всегда иметь вязко-пластичные деформации, так называемые деформации течения. При чем вязкость льда в зависимости от направления усилий может меняться в больше чем в 100 раз. Проявление упругих свойств льда можно наблюдать только при мгновенных нагрузках, но предел упругости ничтожно мал.

Важная особенность строения льда I - подвижность атомов водорода в кристаллической решетке, беспрерывно меняющейся под влиянием внешних воздействий (температурные изменения и изменения давления и др.). Снижение температуры приводит к снижению подвижности атомов водорода, благодаря чему лед принимает более упорядоченную структуру, становится плотнее и прочнее. При достижении -78 °С решетка становится стабильной, так же при температуре ниже -70 °С гексагональная сингония льда сменяется кубической. С повышением температуры возрастает энергия активизации молекул льда и ускоренная их перегруппировка с ослаблением молекулярных связей, что приводит снижению прочностных свойств льда.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что в естественных природных условиях, где изменения термодинамических условий неизбежно, такие свойства льда, как строение, вязкость и т.д. подвержены значительным изменениям, которые служат причиной нестабильности как свойств льда, так и свойства мерзлого грунта в целом.

Стоит отметить, что поскольку поверхностные электромолекулярные связи льда в разы превышают молекулярные связи свободной воды, имеет место адсорбция свободной воды поверхностью льда.

1.1.3. Вода в жидкой фазе

Как было показано Н.А,Цытовичем еще в 1939 года и в дальнейшем экспериментально подтверждено, при отрицательных температурах (до -70°С) в грунте всегда содержится какое-то количество незамерзшей воды.

Вода в жидкой фазе в мерзлых грунтах может пребывать в двух состояниях:

1. Прочносвязанная вода с поверхностью минеральных частиц (с избытком энергии активизации). Это вызвано тем, что огромные электромагнитные силы не дают воде стать частью гексагональной кристаллической решетки льда, несмотря на очень низкие температуры.

2. Рыхлосвязанная - воды переменного фазового состава. Согласно Б.Н.Достовалову и В.А.Кудрявцеву, Вода с недостатком энергии активизации, которая выделяет тепло кристаллизации при калориметрировании и замерзает при отрицательных температурах ниже 0°С. Чем тоньше слой такой воды, тем более сильному воздействию поверхности минеральных частиц она она будет подвержена и тем ниже будет температура ее замерзания.

Снижение температуры кристаллизации рыхлосвязанной воды объясняется тем, что между слоями связанной и подвижной воды образуется менее связанной (более подвижной) воды чем свободная. Этому слою необходимо больше энергии и более низкая температура замерзания.

С понижением температуры мерзлого грунта понижается и количество незамерзшей воды. Для каждого вида грунта характерна своя кривая содержания незамерзшей воды в зависимости от температуры. Содержание воды в жидком состоянии в грунте и ее поведение при внешних воздействиях во многом влияют на физико-механические свойства грунта и обязательно должно учитываться в физике и механике грунтов.

1.1.4. Газообразные компоненты

В роли газообразных компонентов в мерзлых грунтах выступают водяные пары (наблюдается в случае неполного насыщения грунта водой) и газы. Нередко пары воды несут значительный вклад в свойства грунта, поскольку им свойственно перемещаться от мест с большей упругостью (определяемой главным образом температурой) к местам с меньшей упругостью. В водонасыщенных грунтах могут вызвать перераспределение влажности в процессе изменения их температуры и замерзания грунтов.

Роль газов проявляется только в образовании пористости грунтов и повышению упругости, если имеются замкнутые газовые включения.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что мерзлый грунт является сложной многокомпонентной системой, каждая из составляющих которой обладает своими специфическими характеристиками, находится во взаимодействии с другими и существенно влияет на свойства мерзлого грунта в целом.

1.2. Свойства мерзлых грунтов

1.2.1. Физические свойства

Мерзлые грунты, как было сказано ранее, являются четырехкомпонентной системой связанных сообщающихся между собой частиц (твердые минеральные, лед, незамерзшая вода и водяные пары). Таким образом, если у однокомпонентных или квазиоднокомпонентных систем, пренебрегая соединяющимся с атмосферой воздухом, чтобы определить физические свойства грунта, необходимо определить только одну характеристику - удельный вес; для двухкомпонентной соответственно две характеристики (к удельному весу добавляется влажность); три характеристики для трехкомпонентной (удельный и объемный веса и влажность; то для системы мерзлого грунта нужно измерить

опытным путем целых 4 основных показателя, дабы правильно оценить физические свойства и описать состояние.

К этим четырем характеристикам относятся:

- объемный вес γ, г/см³;
- суммарная весовая влажность W_c, дол единица;
- удельный вес твердых частиц $\gamma_{уд}$, г/см³;
- весовое содержание воды (незамерзшей) $W_н$.

Первую характеристику, объемный вес мерзлого грунта γ, определяют по монолитам мерзлого грунта с помощью спецальных грунтоносов или методом гидростатического взвешивания в охлажденном керосине или, что считается наилучшим, с помощью взвешивания (в ящике или бочонке шурфа, взятого на данной глубине, вместе со всем вырубленным грунтом и последующим измерением сторон, вырубленного параллелепипед, т.е. определением его размеров. Измерение объемного веса необходимо производить при отрицательной температуре окружающего шурф воздуха.

Для всех способов используется формула:

$$\gamma = \frac{g_{гр}}{V_{гр}} \quad (1)$$

где: $g_{гр}$- вес образца (шурфа)

$V_{гр}$- объем образца (шурфа)

Суммарная влажность W_c- это отношение массы воды во всех агрегатных состояниях к массе скелета мерзлого грунта, определяется согласно ГОСТ 5180-84. Состоит из влажности за счет включений льда $W_в$, влажности прослоек мерзлого грунта расположенного между слоями льда $W_г$, которая состоит из влажности за счет цементирующего минеральные частицы порового льда $W_ц$ и влажности незамерзшей воды $W_н$. Таким образом суммарная влажность равна:

$$W_c = W_в + W_г = W_в + (W_ц + W_н) \quad (2)$$

Как правило все параметры влажности, входящие в выражение определяются опытным путем в результате полевых и лабораторных исследований. В случае, если определить влажность прослоек мерзлого грунта, расположенного между слоями льда $W_г$ не представляется возможным, то для глинистых грунтов ее приравнивают ко влажности на границе раскатывания:

$$W_г = W_р \quad (3)$$

где $W_р$- влажность, которая соответствует нижнему пределу пластичности (на границе раскатывания, доли единиц.

Влажность незамерзшей воды $W_н$ вычисляют при изысканиях калориметрическим методом. Для мерзлых грунтов со слабой засоленностью можно определить ее по формуле:

$$W_н = k_н W_р \ , \quad (4)$$

где $k_н$- коэффициент пропорциональности, зависящий от числа пластичности $W_р$и температуры Т грунта.

Коэффициент $k_н$ можно определить по Таблице 1.1 .

Таблица 1.1

Значения коэффициента $k_н$в зависимости от температуры и числа пластичности

Грунты	Число пластичности $W_п$	Коэффициент пропорцинальности$k_н$, при Т, °С								
		-0,3	-0,5	-1	-2	-3	-4	-6	-8	-10
Пески и суспеси	$W_п \leq 0,02$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Суспеси	$0,02 \leq W_п \leq 0,07$	0,6	0,5	0,4	0,35	0,33	0,3	0,28	0,26	0,25
Суглинки	$0,07 \leq W_п \leq 0,13$	0,7	0,65	0,6	,5	,48	,45	,43	0,41	0,4
Суглинки	$0,13 \leq W_п \leq 0,17$		0,75	0,65	0,55	0,53	0,5	0,48	0,46	0,45

Глины	$W_п \geq 0,17$		0,95	0,9	0,65	0,63	0,6	0,58	0,56	0,55

Удельный вес твердых частиц $\gamma_{уд}$измеряют используя пикнометр, предназначенный для образцов грунта нарушенной структуры.

Из всего этого следует, что для определения физических характеристик мерзлого грунта нужно измерить объемный вес мерзлого грунта и его суммарную влажность для ненарушенной структуры мерзлого грунта, а по образцам нарушенного грунта находят влажность за счет незамерзшей воды и удельный вес его минеральных частиц.

Одной из важнейших характеристик состава мерзлого грунта является его льдистость, соответствующая естественной температуре грунта. Относительная весовая льдистость (отнесенная к массе высушенного грунта) вычисляется по формуле:

$$i = \frac{W_c - W_н}{W_c} \quad (5)$$

Еще одна значимая характеристика мерзлого грунта это их объемная льдистость т.е. отношение объемов льда и объема мерзлого грунта (тут не учитываются большие сплошные прослойки льда, которые, как правило измеряют отдельно).

Поскольку вес воды содержащейся в единице объема мерзлого грунта равняется весовой влажности грунта, умноженной на объемный вес частиц скелета грунта, то можно получить выражение для объемной льдистости в виде:

$$i_{об} = \frac{\gamma}{\gamma_л}\frac{W_c - W_н}{1 + W_c} \quad (6)$$

Строительные нормы и правила (СНиП) рекомендуют рекомендуют дополнительно определять еще один классификационный показатель физических

свойств мерзлого грунта, так называемую объемную льдистость включений $Л_в$, в которую входит лед только в ледяных включениях, поровый лед не учитывается.

$$Л_в = \frac{\gamma_{уд} W_в}{\gamma_л + \gamma_{уд}(W_c - 0{,}1 W_н)} \quad (7)$$

Использование последней формулы затрудняется тем, что необходимо точно определять влажность за счет ледяных включений $W_в$ (линз и прослоек льда). $\gamma_{уд}$берут примерно 0,9 г/см³ или 0,0009 кг/см³.

Согласно Н.А. Цытовичу, для нахождения суммарной влажности мерзлого грунта чаще оказывается более удобным и наглядным определять не весовую влажность W_c, а так называемую общую влажность $W_{общ}$, относящуюся к весу всего не высушенного грунта. Это позволяет исключить трудные для воспроиятия величины влажности, превышающие 100%. Например весовой влажности $W_c =$ 200%будет соответствовать общая влажность 66%.

Поскольку общая влажность - это есть отношение массы воды к массе всего грунта, то, считая, что вес высушенного грунта равен весу его скелета $\gamma_{ск}$, который равняется

$$\gamma_{уд} = \frac{\gamma}{1 + W_c} \quad , \quad (8)$$

то получим, что

$$W_{общ} = \frac{W_c}{1 + W_c} \quad (9)$$

Для нахождения удельного веса составляющих компонентов мерзлого грунта следует использовать формулы:
для твердых частиц

$$g_{ск} = \gamma \ (1 - W_{общ}) \ ; \quad (10)$$

для воды в жидкой фазе

$$g_{\text{п}} = \gamma \ \ (1 - i); \tag{11}$$

и для льда

$$g_{\text{л}} = \gamma \ \ W_{\text{общ}} i; \tag{12}$$

Разумеется в сумме вес всех составляющих мерзлого грунта должен равняться весу единицы объема:

$$g_{\text{ск}} + g_{\text{п}} + g_{\text{л}} = \gamma \tag{13}$$

Представленные выше показатели физических свойств мерзлого грунта также позволяют определить дополнительный ряд показателей физических свойств мерзлых грунтов: пористость, водонасыщенность, объем газов в единице объема и прочее. Формулы для вычисления названных в этом параграфе физических величин приведены в Таблице 1.2.

Таблица 1.2

Взаимосвязь показателей основных физических свойств мерзлых грунтов

Величины определяемые опытным путем	Величины вычисляемые косвенно, по формулам
Объемный вес γ естественной ненарушенной структуры Суммарная весовая влажность W_c Удельный вес твердых частиц $\gamma_{\text{уд}}$	Общая влажность $W_{\text{общ}} = \frac{W_c}{1+W_c}$ Относительная весовая льдистость $i = \frac{W_c - W_{\text{н}}}{W_c}$

Продолжение таблицы 1.2

Величины определяемые опытным путем	Величины вычисляемые косвенно, по формулам
Влажность за счет незамерзшей воды $W_{\text{н}}$	Объемная льдистость $i_{\text{об}} = \frac{\gamma}{\gamma_{\text{л}}} \frac{W_c - W_{\text{н}}}{1 + W_c}$ Коэффициент пористости $\varepsilon_{\text{М}} = \frac{\gamma_{\text{уд}} - \gamma_{\text{ск}}}{\gamma_{\text{ск}}}$ Коэффициент водонасыщенности или степень влажности $I_{\text{в}} = \frac{W_c * \gamma_{\text{уд}}}{\varepsilon_{\text{М}} \gamma_{\text{в}}}$ Вес составных частей мерзлого грунта: твердых частиц: $g_{\text{ск}} = \gamma \ (1 - W_{\text{общ}})$, незамерзшей воды: $g_{\text{п}} = \gamma \ (1 - i)$, и льда: $g_{\text{л}} = \gamma \ W_{\text{общ}} i$. Объем газов в 1см³: $V_{\text{а}} = \left(\frac{\varepsilon_{\text{М}}}{\gamma} - \frac{W_{\text{общ}}}{\gamma_{\text{в}}}\right)$

1.2.2. Теплофизические свойства

Распределение температурного поля мерзлых грунтов зависит от их теплофизических характеристик, и в первую очередь определяется показателями теплоемкости и теплопроводности, которые в свою очередь зависят от физических свойств грунтов.

Если теплофизические свойства грунтов обладают разнородными характеристиками, то их оценка может производиться по усредненным характеристикам слоев.

Для талых грунтов весовая теплоемкость равна:

$$C_x = \frac{0.2+W}{1+W}, \quad (14)$$

для мерзлых грунтов

$$C_x = \frac{0.2+W(1-0.5i_0)}{1+W}, \quad (15)$$

Для гравийных, песчаных и галистых грунтов при температуре ниже -0,5 °С, относительная льдистость которых практически равна 1

$$C_x = \frac{0.2+0.5W}{1+W}, \quad (16)$$

где W - весовая влажность грунтов, выраженная в долях единицы;

i_0- относительная льдистость.

Объемная теплоемкость грунтов вычисляется:

$$C_{об} = \gamma_{об} C \quad (17)$$

где С - весовая теплоемкость грунта.

Чем больше влаги в грунте, тем больше его теплоемкость, так как теплоемкость воды и льда в 2,5-5 раз выше, чем у минеральных составляющих грунта. Теплофизические характеристики талых и мерзлых грунтов представлены на рисунке 1.1.

Теплоёмкость глинистых и мерзлых грунтов зависит не только от влажности, но и от веществе относительной льдистости, С придел принимать по графику рис. 1.1, б), составленному для $C_м$ в зависимости от $W+W_н$, где

содержание незамерзшей воды $W_{н}$ зависит от температуры (см. рис. 1.1); остальные величины на том же графике определяются в зависимости от W.

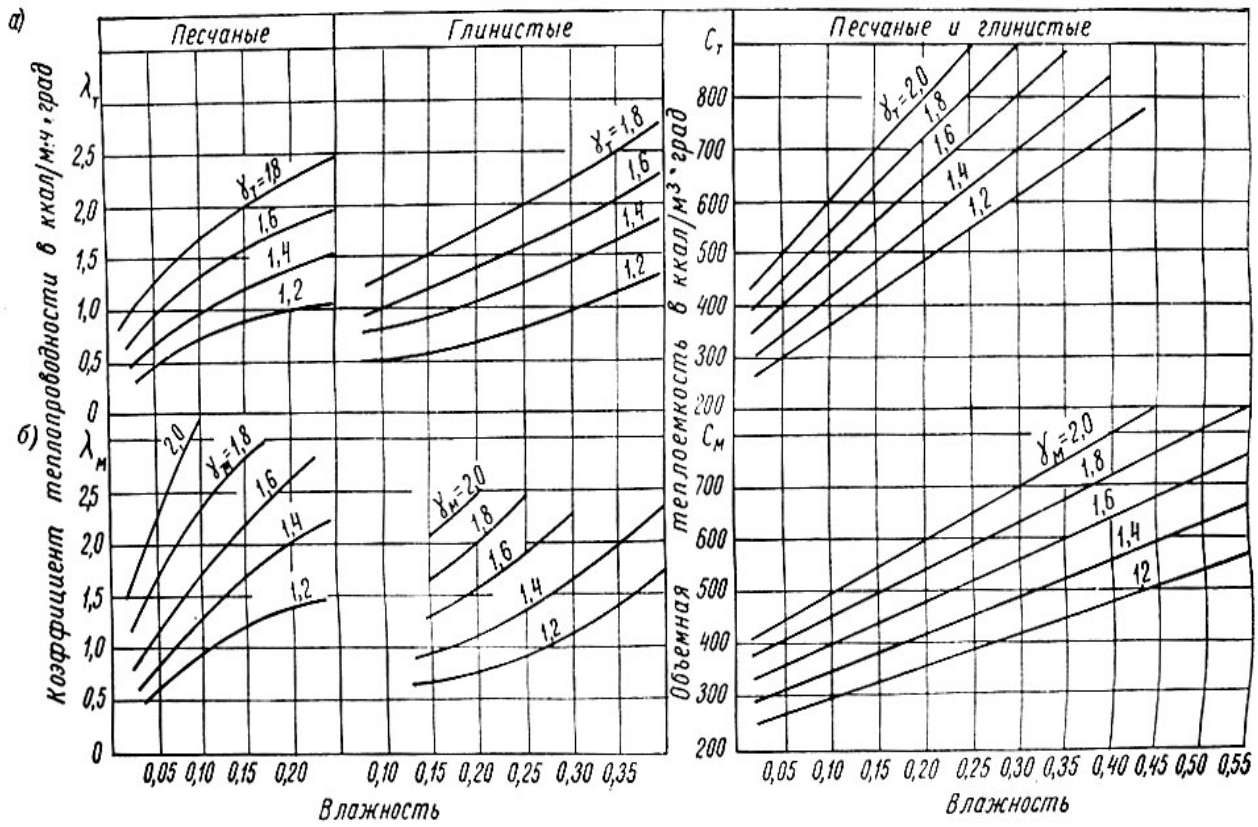

Рисунок 1.1 - Теплофизические характеристики грунтов. а - талых; б - мерзлых

Одним из главных свойств в теплотехнических расчетах является скрытая теплота плавления льда, она подразумевает количество тепла, расходуемое на плавление льда, содержащегося в единице объема мерзлого грунта:

$$Q = V_{л}\rho, \tag{18}$$

где ρ - скрытая теплота плавления 1 кг льда, принимаемая равной 80 ккал/кг;

$V_{л}$ - объем льда в $м^{3}$.

В свою очередь

$$V_{л} = W_{об} i \quad {}_{0}\gamma_{об}^{м} \tag{19}$$

Коэффициент теплопроводности грунта λ зависит от плотности и влажности, состава и температуры.

Для приблизительных определений коэффициента теплопроводности грунтов с влажностью, не превышающей полного насыщения, можно воспользоваться графиками, составленными по данным В. П. Ушкалова и М. С. Керстена (США, университет штата Минесота).

Для глинистых грунтов значения К м на графике указаны при температуре -10 °С; при другой температуре они определяются по формуле:

$$\lambda_{м,t} = \lambda_{м,10} - \frac{W_н}{W}(\lambda_м - \lambda_т) \qquad (20)$$

Важным теплофизическим свойством грунта является коэффициент температуропроводности, которой соответствует скорость выравнивания температуры в нем:

$$a = \frac{\lambda}{C_{об}}. \qquad (21)$$

1.2.3. Механические свойства

Во время эксплуатации вечномерзлых грунтов как основания для строительства, инженеру приходиться работать с очень специфичным природным материалом, отличающимся по характеристике от других материалов. Имея большую чувствительность к наружным воздействиям, мерзлый грунт даже от небольших перемен величины, свойств и продолжительности воздействия меняет свои механические свойства. В связи с этим необходимо знать, изменение каких механических свойств важно учесть для построения зданий (таких как, основание, фундамент и т. п.) с использованием вечномерзлых грунтов и к чему приводят эти воздействия, т. е. необходимо установить метод измерения величин расчетных характеристик механических свойств мерзлых грунтов не забывая про

нестабильность и рассчитывать изменения, происходящие за время использования сооружений.

Требуется предварительно выявить значение для практики изменений прочности мерзлых грунтов и ее максимальное значение, деформацию мерзлой грунтовой толщи по глубине и многие другие изменения свойств, основными показателями следует брать: показатели его прочности (сопротивление внешним силам, замерзанию) и модули деформируемости грунтов при высоких и низких температурах.

Факторы вызывающие изменчивость механических свойств грунтов в разных состояниях:

А) перемена температуры грунтов в обычных условиях и под воздействием построенных зданий;

Б) изменение напряженного состояния в грунтах находящимся в разных состояниях под действием внутренних и внешних воздействий;

В) продолжительность нагрузки, определяющий релаксацию напряжений и ползучесть мерзлых и протаивающих грунтов.

Температура вечномерзлых грунтов меняется незначительно в естественных условиях, но вот температура по глубине распределяется неодинаково. Неравномерность распределения предусматривает неоднородность вечномерзлых грунтов, очевидно, что температура мерзлых грунтов обратно пропорционально сопротивлению внешним силам и прямо пропорционально деформируемости. Но вот интенсивность воздействия температуры на механические свойства мерзлых грунтов отличается и зависит от области фазовых превращений воды.

В области значительных фазовых превращений воды (песчаных грунтов от 0 до -0.5°С, глинистых грунтов от 0 до -5°С) факторами, обуславливающими прочность мерзлых и вечномерзлых грунтов, служат количественное содержание льда и незамёрзшей воды и зависимость их содержания от перемены отрицательной температуры.

Когда температура снижается с -1 до -2°С предел прочности для мерзлого песка от обычного сжатия меняется с 64 до 75 кГ/см² , т. е. около 15%, а для

мерзлой глины при таком же снижении температуры с 10 до 15 кГ/см² , т. е. на 50%, это очевидно, ведь количество незамёрзшей воды у песка уменьшилось примерно на 0.1%, а у мерзлой глины на 5%.

Следовательно, в области интенсивных фазовых превращений воды доминирует фактор льдистости или содержания незамёрзшей воды в мерзлых грунтах.

Статистика говорит об увеличении предельной прочности мерзлых грунтов с понижением их температуры в области несущественных фазовых превращений воды, разъяснить возрастание прочности мерзлых грунтов только возрастанием их льдистости (или понижением содержания незамерзшей воды) не является возможным. В этом случае приобретает огромное значение одновременное влияние второго фактора - качественного изменения льда (повышение его прочности при уменьшении отрицательной температуры).

У практически замерзшего грунта прочностные свойства данного мерзлого грунта устанавливаются в основном прочностью цементирующего его льда и ее увеличением при уменьшении температуры.

Можно отметить, что для льда свойственна очень слабая водородная связь атомов, при этом их подвижность мгновенно понижается с уменьшением температуры, что и вызывает упрочнение структуры льда. Но упрочнение льда с уменьшением температуры длиться лишь до некоторого предела (близко к -70°С, когда прочность льда достигает величины, приближенной к максимальной).

Ощутимое значение для прочностных свойств мерзлых грунтов имеет их анизотропия, она очень сильно выражена у льда. По С. С. Вялову, скорость деформирования льда при сдвиге параллельно базисной плоскости кристаллов равна ϑ = 0,34 мм/ч, а перпендикулярно этой плоскости ϑ = 0,01 мм/ч. Вязкость льда больше вязкости мерзлых грунтов, что определяет более медленное, чем у мерзлых грунтов, протекание реологических процессов по льду.

Отрицательная температура мёрзлых грунтов обратно пропорциональна контактной сопротивляемости их сдвигу. По данным Н. К. Пекарской, при

положительной температуре $\tau_{пр}$ = 1 кГ/см² , а при отрицательной θ = -0.8°С Тпр = 6.5 кГ/см² и при θ = -2 градуса Цельсия $\tau_{пр}$ = 9.0 кГ/см² .

Это определяет нестабильность механических свойств мерзлых грунтов при изменении температуры.

При перемене величины отрицательной температуры очень сильно отражаются и на деформируемости мерзлых грунтов.

Сжимаемость высокотемпературных мерзлых грунтов (в значительных фазовых превращений воды) огромна и близится к сжимаемости плотных глин (коэффициент относительной сжимаемости А приблизительно 0.005-0.03 см² /кГ), а сжимаемостью грунтов в области почти замершего состояния, в результате ее незначительной величины, в инженерных расчетах, можно пренебречь.

В результате разных в естественных условиях температуры вечномерзлых грунтов по глубине отмечается неоднородность их прочностных и декоративных свойств, что образует особые условия при расчете и проектировании фундамента зданий на вечномёрзлых грунтах.

При каждом виде строительства на вечномерзлых грунтах большое значение имеют прогноз перемены температур грунта ниже подошвы фундамента и самое главное повышение температуры основания до положительной.

Когда возводят здания по методу сохранения грунтов фундамента в мерзлом состоянии очень важно знать, какую температуру примет мерзлый грунт после длительного промежутка времени (около 10-15 лет), ведь в конце при этом составе мерзлого грунта основным признаком, указывающим его прочностные свойства, будет величина отрицательной температуры. Нужно также учесть и распределение температур в вечномерзлом грунте ниже чаши простаивания, чтобы корректно использовать его несущую способность при возведении глубоких опор (столбовых, свайных и т. п.).

Изменчивость свойств грунтов возникает не только при удержании мерзлого состояния грунтов, но и при оттаивании грунтов под зданиями. Первое, в процессе оттаивания меняются граничные условия, ведь глубина расположения вечномерзлого грунта постоянно возрастает; второе, для глинистых грунтов на

протяжении долгого времени после оттаивания происходит уплотнение грунта, что для начала влияет на изменение модуля деформации грунтов по глубине оттаивающего слоя.

Изменение коэффициента пористости оттаявшего грунта под действующими силами понижается с глубиной по экспоненциальному закону. Что очень сильно влияет на распределение давлений по глубине оттаявшего слоя и наиболее заметно на величине давлений по контактной поверхности талого и мерзлого слоев.

В неоднородном по сжимаемости слое на сжимаемом основании площадь эпюры сумм главных напряжений, величине которой пропорциональна осадка уплотнения при оттаивании, иногда очень сильно меньше площади такой же эпюры для однородного слоя и даже для однородного полупространства. Вследствие чего, перемена сжимаемости по глубине очень сильно сказывается на величине расчетных характеристик деформируемости оттаивающих грунтов.

Сопротивление мерзлых грунтов сжатию (при моментальном загружении и продолжительном воздействие нагрузки) имеет важнейшее практическое значение для оценки прочности мерзлых грунтов при недлительных нагрузках, преимущественно для выбора расчетных давлений в основаниях сооружений, строящихся на вечномерзлых грунтах, еще и для расчетов на прочность стенок из мерзлых грунтов при проходке шахт и котлованов методом искусственного замораживания.

Важнейшее значение для оценки сопротивления мерзлых грунтов нормальным усилиям имеют:

1) близкая к максимуму их прочность, в основном приравниваемая к величине временного сопротивления.

2) предельно-длительная прочность, иными словами сопротивление, при котором деформации всегда имеет затухающий характер и не переходят еще в пластично-вязкое течение, заканчивающееся постепенным разрушением грунта.

Укажем, что величина временного сопротивления мерзлых грунтов сжатию v, определяется при стандартной скорости увеличения нагрузки (в 15-20 кГ/см2 в

1 мин), условно принимается за мгновенное сопротивление. Обусловленность временного сопротивления сжатию, ведь мерзлые грунты разного состава деформируются при разрушении не одинаково, более того при пластическом деформировании разрушающую нагрузку определить невозможно, в таких случаях определяют предел механической текучести по излому графика ln – ln, где - сопротивление сжатию; l - продольная деформация. Предел механической текучести - переменная, имеющая прямо пропорциональную зависимость от скорости приложения нагрузки.

Впрочем, предел продолжительной прочности при сжатии устанавливается гораздо легче напрямую испытав образцы мерзлых грунтов благодаря шаровому штампу или же динамометрическим прибором.

Величина длительности прочности при одноосном сжатии иначе говоря давления, при котором еще не возникает прогрессирующего точения, определено и не ожидая полного затухания деформаций образа мерзлого грунта при различных степенях нагрузки, если известен параметр Т гиперболического ядра ползучести.

Природа зависимости сопротивления одноосному сжатию мерзлых грунтов от общей влажности принципиально схож для всех разновидностей мерзлых грунтов, то есть: при неполном водонасыщении и рыхлом сложении сопротивление сжатию увеличивается; при полном же водонасыщение вначале сопротивление понижается с повышением влажности, доходя до сопротивления сжатия льда, далее при значительных влажностях, почти остается неизменным и при дальнейшем увеличении влажности доходит постепенно к сопротивлению сжатию чистого льда.

Сопротивление мерзлых грунтов сдвигу. Критерий прочности всех материалов в данной точке, как правило, служит достаточная сопротивляемость его сдвигу в этой точке. Из за этого сопротивление сдвигу мерзлых грунтов служит такой их механической характеристикой, не имея знания которой не представляется возможным рассчитать ни предельное сопротивление грунтов в основаниях сооружений, ни прочность их в различного рода ограждающих

сооружений, ни устойчивость массивов мерзлых грунтов при действий сдвигающих нагрузок.

Разрушающее сопротивление мерзлых грунтов плоскостному сдвигу зависит от нормального давления, говоря другими словами зависимы не только силами сцепления, но так-же и внутреннем трением и при малых давлениях (10-15кГ/см²) может быть описано уравнением первой степени от нормального давления с переменными параметрами, зависящими от параметра отрицательной температуры -0°С и времени действия нагрузки t, т. е.

$$\tau_{\text{пр}} = c_{\theta,t} + tg\varphi_{\theta,t}p. \quad (22)$$

Результаты установления предельного сопротивления сдвигу мерзлых грунтов при разной температуре демонстрируют, то что температура обратно пропорциональна сопротивлению сдвига, как суммарный, так и составляющие: угол внутреннего трения °и сцепление с кГ/см2. К примеру, для мерзлой глины (Wc= 33%)при = -1°С = 14°, а при = -2°С =22°. При температуре, приближенной к 0°, угол внутреннего трения мерзлых грунтов примерно равен углу внутреннего трения грунтов немерзлых, контакт мерзлых грунтов имеет намного большее значение в сравнении с контактом грунтов немерзлых.

1.2.4. Реологические свойства

Мерзлые грунты являются примером тел, в которых деформации и напряжения, возникающие в результате внешней нагрузки не остаются постоянными, а напротив меняются со временем, вызывая процессы релаксации напряжений и ползучести. Такие процессы называют реологическими. Развитие подобных процессов в мерзлых грунтах обязано особенности их внутренних связей, одну из важнейших ролей в которых играет лед, являющийся идеально текучим твердым телом.

Наличие в мерзлых и вечномерзлых грунтах слоёв льда, выхывает пластические течения и переориентировку кристаллов при нагрузке практически

любой величины. В свою очередь, наличие в мерзлых грунтах вязких пленок воды в жидкой фазе, обуславливает при добавочной нагрузке возникновение подземных течений.

Также известно, что прочностные и деформативные свойства мерзлых и немерзлых грунтов различны со свойствами других тел в твердой фазе и немерзлых грунтов тем, что при действии внешней нагрузки в мерзлых грунтах всегда происходит необратимая перестройка структуры, вызывающая спад напряжений и изменение ползучести даже при малых нагрузках, т.е. изменения прочностных и деформативных свойств грунта в течении определённого времени. Однако упругость мерзлых грунтов всегда сохраняется во всех стадиях ползучести.

В 1935 г. было установлено значение фактора времени на механические свойства мёрзлых грунтов. А в 1939 г. впервые экспериментально получена и исследована реологическая кривая для мёрзлого песка и мёрзлой глины. (Рисунок 1.2).

При рассмотрении данной кривой можно сделать вывод о том, что сопротивление мёрзлых грунтов возрастает при увеличении скорости возрастания нагрузки на них, а также реологические кривые при одноосном сжатии как для мёрзлой глины, так и для мёрзлого песка криволинейны, причём у песка при давлениях $\sigma > 3$ кг/см^{2}они переходят в прямые.

Существует два различных класса ползучести – затухающиеи II-незатухающие. Первый класс ползучести возникает при напряжениях мёрзлого грунта, меньших некоторого определённого для данного физического состояния грунта и данной его температуры предела. Второй класс ползучести проявляется при превышении предела напряжения грунта и при дальнейшем увеличении напряжения деформация ползучести ускорится и впоследствии приведут грунт к хрупкому или пластическому разрушению.

Незатухающая ползучесть имеет три стадии:

Первая стадия - неустановившаяся ползучесть, скорость деформирования которой стремиться к константе. Во время данной стадии происходит закрытие

микротрещин, залечивание дефектов структуры влагой, выжимаемой из перенапряженных зон и вновь замерзающей, уменьшение свободной пористости за счёт сдвигов частиц и частичное закрытие или уменьшение микротрещин; всё это вызывает реологическое уплотнение мёрзлых грунтов, достигающих ощутимых величин.

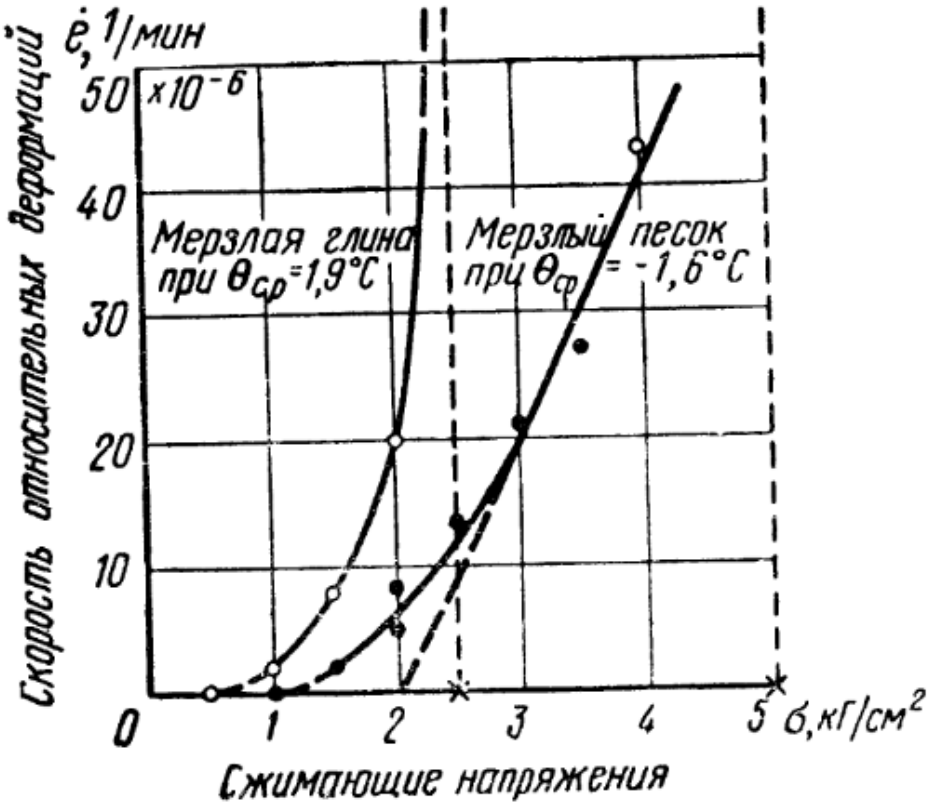

Рисунок 1.2 - Реологическая кривая при однородном сжатии для мерзлых глины и песка.

Вторая стадия - установившаяся ползучесть, или пластично-вязкого течения практически с постоянной скоростью деформирования, которая может продолжаться тот или иной промежуток времени. Преобладает закрытие микротрещин, при этом уменьшение свободной пористости мёрзлого грунта компенсируется образованием новых, преимущественно микротрещин.

Третья стадия - прогрессирующее течение характеризуется возрастающей скоростью деформации и оканчивающуюся хрупким разрушением или пластической потерей устойчивости грунта. Во время течения данной стадии

наблюдается развитие и появление микротрещин, а также переход некоторых из них в макротрещины из за чего происходит разуплотнение мёрзлого грунта. При этом, ледяные включения к данному времени успевают изменить свою кристаллическую структуру и базисную ориентировку параллельно направлению сдвигов, что значительно уменьшает сопротивлению сдвигу мёрзлого грунта.

1.3 Выводы по главе 1

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что мерзлые грунты - это сложной многокомпонентной системой, свойства которой чувствительны к внешним воздействиям и значительно отличаются от свойств талых грунтов.

Мерзлые грунты являются весьма своеобразным строительным материалом. При использовании таких грунтов в качестве оснований или среды для различного рода строительных сооружений необходимо знать и учитывать глубину промерзания грунта.

Таким образом определение глубины промерзания грунта является одной из важнейших задач на стадии проектирования строительных объектов в северных регионах.

2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТА

2.1. Обзор методов

Глубину сезонного оттаивания грунта можно определить при помощи измерения наибольшего расстояния от покрова земли (без учета травянистого покрова) до начала многолетнемерзлой почвы. Начало сезонного оттаивания обычно совпадает с переходом температуры через 0°С весной и достигает своего максимума в летний период. Мощность оттаивания обычно изменяется в одном месте с течением времени и определяется величиной теплооборота при плюсовых температурах.

Данные работы проводят в целях:

а) Предопределения глубины заложения и подбора типа фундаментов сооружений и создания процедур, которые исключают возможность появления искажения оснований;

б)Формирования спецпроцедур по охране экологии осваиваемых территорий;

в)Аргументации значений приведенной глубины оттаивания почв.

Для установления глубины сезонного оттаивания обычно применяют методы параллельных измерений (метод непосредственных измерений, криотекстурный метод, геофизические методы) и методы постоянных наблюдений (температурный метод и метод измерения мерзлотомерами). Такие методы обычно фиксируют в проекте исследований, которые зависят от инженерно-геологических и гидрогеологических условий, допустимости применения и экономической рациональности метода.

Условия использования базисных и допускаемых к применению методов приведены ниже в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Методы определения глубины сезонного оттаивания и условия их применения

<table>
<tr><th colspan="2">Метод определения</th><th>Вид полевых работ</th><th>Срок выполнения измерений и наблюдений</th></tr>
<tr><td rowspan="3">Основные</td><td>Метод непосредстенных измерений</td><td>Маршрутные наблюдения, проходка горных выработок</td><td>Период положительных температур воздуха (кроме первого месяца)</td></tr>
<tr><td>Температурный</td><td rowspan="2">Режим наблюдения</td><td rowspan="2">Период положительных температур воздуха и первый месяц периода отрицательных температур воздуха</td></tr>
<tr><td>Метод измерения мерзлотомерами</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Допускаемые к применению</td><td>Криотекстурный</td><td>Проходка горных выработок</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">Геофизические</td><td>Электроразведка</td><td rowspan="3">Период положительных температур воздуха (кроме первого месяца)</td></tr>
<tr><td>Сейсморазведка</td></tr>
<tr><td>Радиолокация</td></tr>
</table>

Позицию точек , в которых определяют глубину оттаивания , устанавливают на основе инженерно-геологической съёмки с учётом положения имеющихся и конструированных зданий и сооружений.

2.2. Метод непосредственных измерений

Глубину оттаивания грунта можно измерять как с поверхности, так и в горных выработках, таких как скважины, шурфы и др. В зависимости от типа грунта, с поверхности измерения можно проводить при помощи щупа, погружая его до упора в мерзлую часть грунта. Он представляет собой легкий, заостренный к концу, стержень, длина которого составляет 1,5 м, каждые 5 см имеют метку для удобства измерений.

Скважины пробуривают на небольшой скорости ручного или механического бурового комплекса без промывки. Если скважина заполнена водой, то в такой скважине измерения не проводятся. В скважинах глубину оттаивания измеряют при помощи рулетки или метра. При бурении необходимо сохранять керн в исходном состоянии, т.к. по нему определяют глубину промерзания.

Для точности исследования проводят три измерения (расстояние между измерениями не должно превышать 1м) и принимают наибольшее значение. Затем, определяют глубину сезонного оттаивания грунта, используя формулу:

$$d_{th} = d\sqrt{\frac{\Omega_{max}}{\Omega}}, \quad (23)$$

где d_{th}- измеренная глубина оттаивания, м;

Ω_{th}- сумма градусочасов воздуха за весь период положительных температур воздуха года проведения изысканий (или средняя многолетняя), °С·ч;

Ω- сумма градусочасов воздуха года проведения изысканий с начала периода положительных температур воздуха до момента измерений, °С·ч.

Сумма градусочасов воздуха равна сумме произведений среднедекадных температур воздуха в градусах Цельсия и продолжительности декад в часах.

2.3. Температурный метод

В данном методе глубину сезонного оттаивания определяют по результатам систематических отслеживаний измерений по глубине температуры почв слоя оттаивания и подкладывающего многолетнемерзлого грунта. Для того, чтобы

определить температуру грунта, необходимо применять оборудование и приборы, предусмотренные ГОСТ 25358. Кроме того, приготовление и проведение измерений, а также обработку результатов, выполняют соблюдая данный ГОСТ. Температуру почвы обычно определяют в целевых термометрических скважинах или напрямую в грунте. Кроме того, глубины скважин и шурфов должны быть больше предполагаемой глубины сезонного оттаивания не менее чем на 1 м. Если же глубина предполагаемого оттаивания измерения проводят начиная с глубины 0,2 м через каждые 0,4 м. При больших глубинах – от 0.5 м через каждые 0.5 м. Температуру грунта необходимо измерять а период плюсовых температур, а также в первый месяц минусовых температур раз в 10 дней. По итогам измерения положительных и отрицательных температур почв необходимо постить график изотерм. Глубина оттаивания на графике находится в виде нижнего положения изотермы, которая соответствует температуре застывания грунта (не исключается те случаи, когда температура грунта , равная 0, закрепляется на относительно большом интервале глубин).

2.4. Метод измерения мерзлотомерами

Данный метод подходит для глинистых, песчаных и крупнообломочных грунтов. Для данных типов почв глубина промерзания определяется промежутком от плоскости площадки до границы пласта почвы в твердомерзлом состоянии. Учитывается, что уровень подземных вод находится ниже измеряемой глубины. Здесь измерения проводят при помощи мерзлотомера Ратомского (МР). Он используется для:

1. Аргументации значений приведенной глубины оттаивания почв;
2. Предопределения глубины заложения и подбора типа фундаментов сооружений и создания процедур, которые исключают возможность появления искажения оснований.

Промежуточный пластично-мерзлый слой почвы, который располагается между твердомерзлым и талым грунтами, в толщину твердомерзлого слоя не включается.

В комплектации мерзлотомера Ратомского должны входить следующие составляющие, представленные на рисунке 2.1.

На рисунке имеются обозначения:*а* - общий вид; *б* - продольный разрез; *в* - металлическая трубка; *1* - металлический стержень с кольцом для удержания мерзлотомера в строго фиксированном положении; *2* - войлочная прокладка; *3* - металлический колпачок для закрытия обсадной трубки; *4* - металлическая обойма стержня; *5* - войлочная обертка, стянутая проволокой; *6* - деревянный стержень; *7* - обсадная фенопластмассовая (эбонитовая) трубка; *8* - трубка из некоррозирующей стали, заполняемая глинистым грунтом; *9* - влажный глинистый грунт - заполнитель металлической трубки; *10* - деревянная пробка; *11* - металлическая насадка; *12* - прорези

Глубину проникновения нулевой температуры в данные виды грунтов в природных условиях, определяют при помощи мерзлотомера Данилина (МД), независимо от того, на какой глубине располагаются грунтовые воды, для того, чтобы:

1. Назначить глубину прокладки трубопроводов (водопровода, канализации и т.п.) и разработать их конструкций, которые смогут удовлетворить требования морозоустойчивости;

2. Разработать конструктивные решений и действий, которые смогут исключить вероятность появления нежелательных деформаций земляного покрова и покрытия автотрасс.

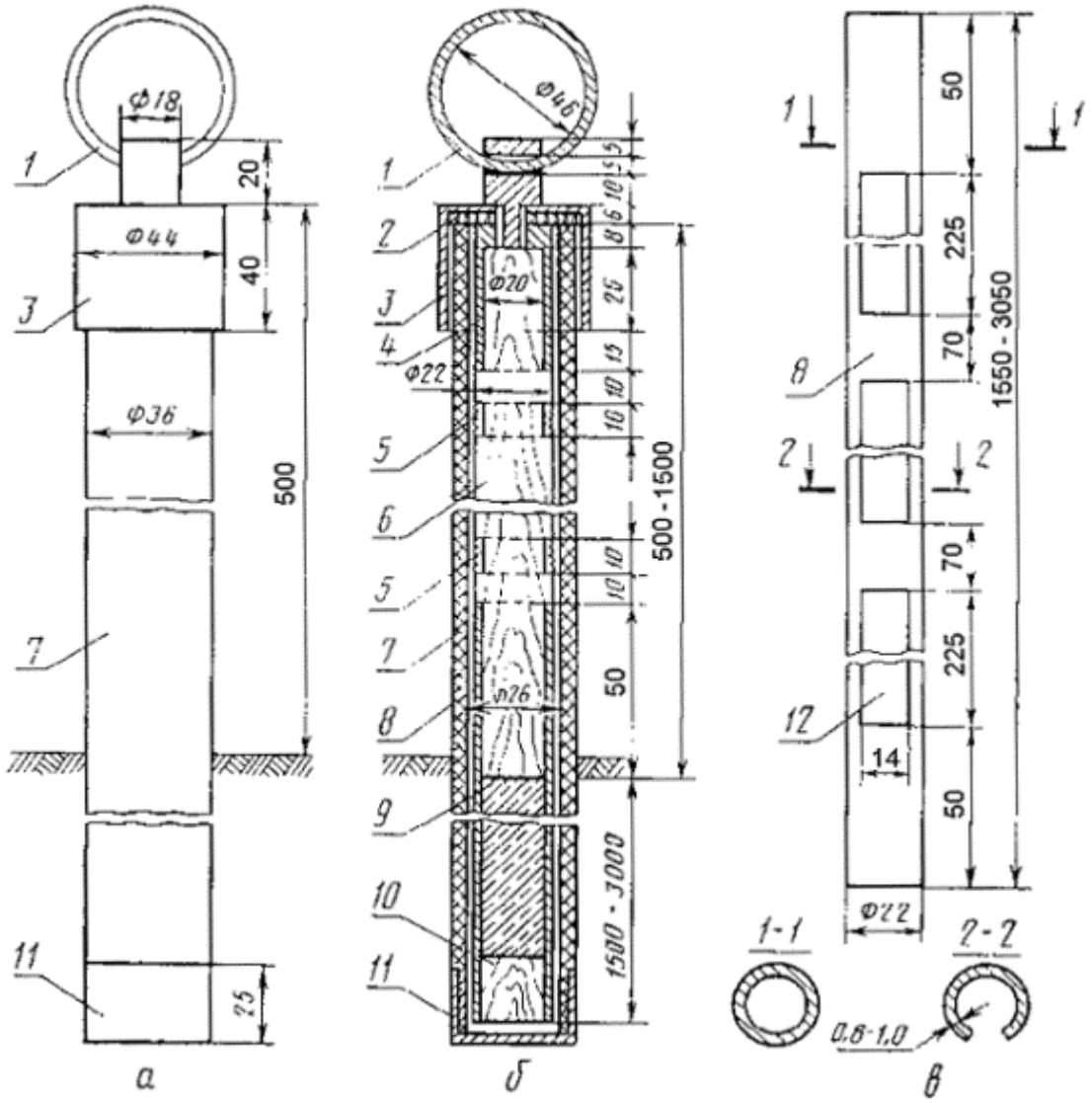

Рисунок 2.1 – Мерзлотомер Ратомского

В комплектации мерзлотомера Данилина должны входить следующие составляющие, представленные на рисунке 2.2. На рисунке имеются спеуиальные обозначения: *а* - общий вид и продольный разрез мерзлотомера, устанавливаемого на поверхности рельефа; *б* - то же, устанавливаемого заподлицо с поверхностью дорожного покрытия; *1* - металлическое кольцо для поднятия и опускания мерзлотомера; *2* - пластмассовый колпачок для закрытия обсадной трубки; 3 - льняной (капроновый) шнур; 4 - войлочная прокладка; *5* - капроновая пробка; *6* - капроновая втулка; *7* - резиновая трубка; *8* - обсадная фенопластмассовая (эбонитовая) трубка; *9* - деревянная пробка; *10* -

металлическая насадка; *11* - металлическая крышка оголовка; *12* - металлический оголовок; *13* - металлическое полукольцо; *14* - углубление для ключа.

Для проведения измерений глубины промерзания и проникновения нулевой температуры в грунт необходимо:

1. Правильно подобрать территорию для установления мерзлотомеров;

2. Пробурить выработку с параллельным отбором образцов почвы;

3. Поместить обсадные трубки;

4. Смонтировать и проконтролировать оборудование мерзлотомеров;

5. Наполнить металлическую трубку МР исследуемым грунтом, а резиновую трубку МД - дистиллированной водой.

Расположение площадки, на которой проводят измерение глубины промерзания грунта или глубину проникновения нулевой температуры в почву и местоположение на ней мерзлотомеров устанавливает строительная организация, учитывая рельеф местности, инженерно-геологических и гидрогеологических условий, а также расположение уже существующих и зданий или сооружений, находящихся в стадии разработки.

Приготовление площадки и контроль оборудования для проведения измерений глубины промерзания или определения положения нулевой изотермы почвы обычно производятся за месяц до начала промерзания грунта. После установления необходимого оборудования, следует провести планово-высотную соотнесение мест введения мерзлотомеров при помощи геодезических методов и зафиксировать их соответствующими отметками.

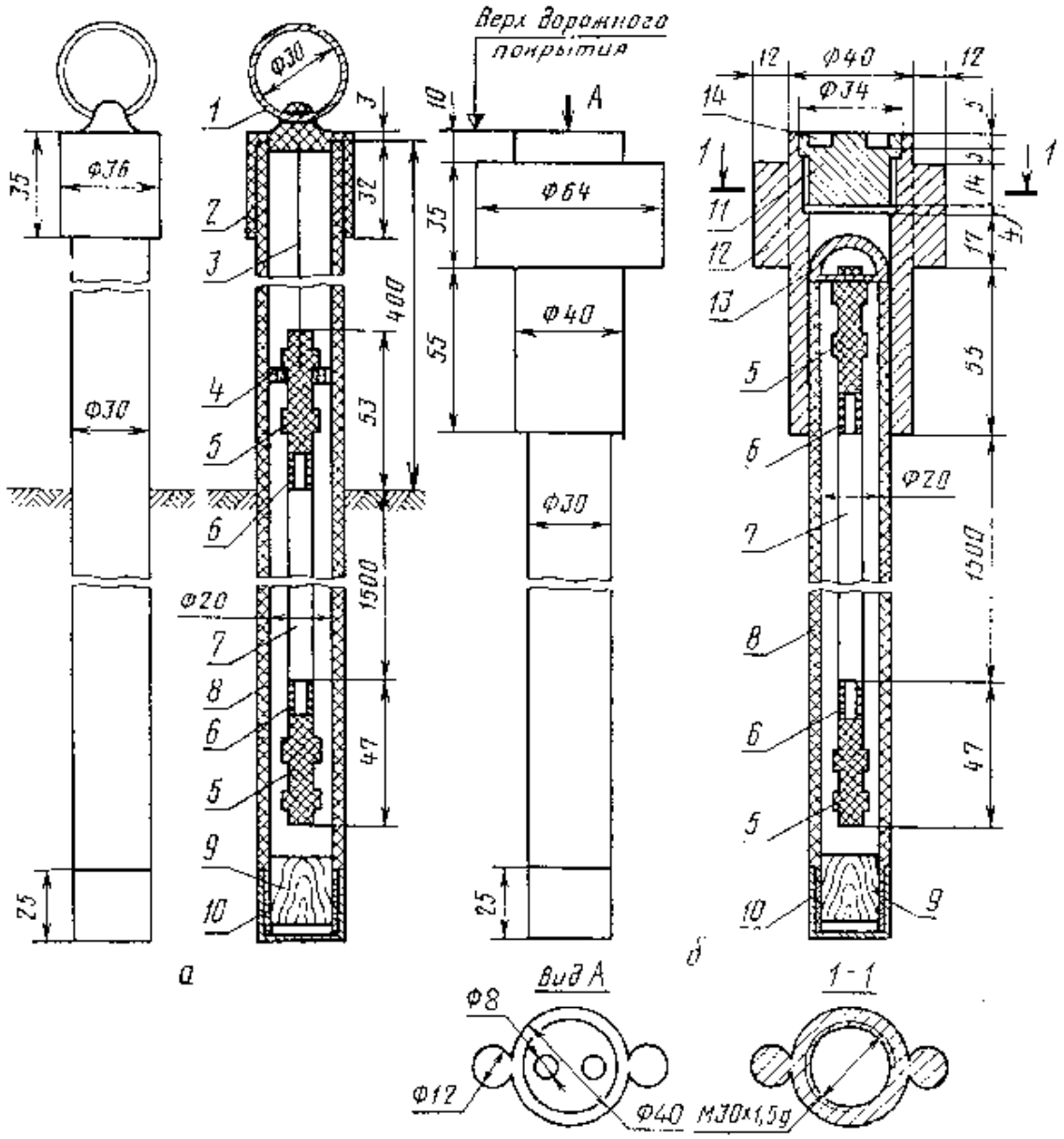

Рисунок 2.2 — мерзлотомер Данилина.

Выработка для установления мерзлотомера должна располагаться под буром, имеющим диаметр наконечника 37 мм. Глубины не должна превышать 30 см глубину прогнозируемого промерзания.

В процессе разработки скважины, необходимой для установки мерзлотомера, пробы грунта обычно отбирают через каждые 10 см для того, чтобы определить его природную влажность. Параллельно из каждого слоя грунта, обычно отбирают пробы, необходимые для определения зернистой составляющей грунта. Такие измерения необходимо проводить не реже чем через

50 см. Итоговые данные анализа почв, взятой из каждой выработки, а также лаконичное описание местоположения скважины, грунтовых напластований и среды их увлажнения (поверхностными или подземными водами) фиксируютя в журнале наблюдений.

В выработку единовременно после ее разработки необходимо поместить обсадную трубку так, чтобы маркер на ней совпал с поверхностью грунта. Расстояние между стенкой выработки и обсадной трубкой обычно засыпают сухим песком и аккуратно уплотняют. Поверхность грунта, в свою очередь, вокруг обсадной трубки приподнимают на 3 - 5 см для отвода жидкости от скважины. МД, который размещают обычно в пределах дорожного покрытия, должен погружаться вровень с ним.

Металлическую трубку МР необходимо нагружать глинистыми почвами. Наряду с этим, глинистый грунт увлажняется до структуры, близкой к границе раскатывания плюс 0,5 числа пластичности, но так, чтобы трубка оставалась герметичной, т.е необходимо устанавливать её вертикально. В местах прорези грунт необходимо вдавить внутрь трубки на 4-5 мм, чтобы предостеречь от его примерзания к стенке обсадной трубки. Использование суглинков с числом пластичности выше 0,12 и глин для заправки металлической трубки МР не допускается. После того, как металлическую трубку МР заполнили грунтом, следует немедленно поставить в обсадную трубку и обозначить время установки мерзлометра в журнале наблюдений. Чтобы привести резервную трубку МД в рабочее состояние, следует придерживаться следующей последовательности: из трубки вынимается верхняя и нижняя капроновые пробки; трубка в U-образном положении заполняется до краев дистиллированной водой; концы пробки закрываются пробками, резиновая трубка опускается в обсадную трубку.

Отслеживания глубины промерзания или проникания в почву нулевой температуры необходимо измерять через каждые 5 дней после наступления отрицательной температуры воздуха, с начала промерзания до полного оттаивания почвы после наступления отрицательной температуры воздуха.

Измерение глубины промерзания почвы по МР необходио проводить в соответствии с последовательностью:

1. Замерить высоту патрубка обсадной трубки мерзлотомера;
2. Вынуть металлическую трубку, заправленную глинистым грунтом;
3. Определить границу слоя грунта в твердомерзлом состоянии через прокол тупой иглой или стальной проволокой;
4. Зафиксировать действительную глубину промерзания грунта, результаты измерений занести в журнал наблюдений;
5. После каждого замера металлическую трубку необходимо сразу же опустить в обсадную трубку мерзлотомера.

При промерзании грунта на всю длину металлической трубки МР, ее освобождают от мерзлого грунта и снова заправляют талым глинистым грунтом. При этом деревянный стержень заменяется другим подходящей длины и мерзлотомер снова опускается в обсадную трубку ниже замеренной глубины промерзания для продолжения наблюдений.

Для определения глубины проникания в почву нулевой температуры по МД необходимо проводить измерения в такой последовательности:

1. Замерить высоту патрубка обсадной трубки мерзлотомера;
2. Вынуть резиновую трубку, заправленную дистиллированной водой;
3. Определить конец ледяного столбика путем прощупывания;
4. Зафиксировать границу между льдом и водой и результаты измерений занести в журнал наблюдений;
5. После последнего замера резиновую трубку необходимо сразу же опустить в обсадную трубку мерзлотомера.

При промерзании всей воды в резиновой трубке необходимо заменить эту трубку другой, деления на которой находятся в шкале от 1500 до 3000 мм. Эту трубку опускают в обсадную трубку за счет подходящего удлинения льняного или капронового шнура, и проводят дальнейшие наблюдения.

В процессе наблюдений нужно следить за вертикальным движением обсадной трубки по белой отметке на ней. При появлении смещения обсадной

трубки в отсчеты действительной глубины промерзания должны вводиться соответствующие поправки с отрицательным знаком (если отметка окажется выше поверхности грунта) или с положительным знаком (если отметка окажется ниже поверхности грунта).

Вычисление значения глубины промерзания или положения нулевой изотермы почвы с учетом поправки следует проводить сразу после замера; если вычисленная величина не совпадает с предыдущим замером, нужно сделать повторный замер.

Наблюдения за промерзанием необходимо продолжать и в случае, если данные мерзлотомера не изменяются или уменьшаются по сравнению с предыдущими замерами.

2.5. Расчетный метод определения сезонной глубины промерзания грунта

Нормативную глубину сезонного промерзания грунта считают, как среднюю годовых максимальных глубин сезонного промерзания грунтов (по данным измерений за 10 лет) на открытой, свободной от снега площадке при уровне подземных вод, расположенном ниже глубины сезонного промерзания грунтов.

Нормативную глубину сезонного промерзания грунта d_{fn}, м, если нет данных многолетних измерений определяют, пользуясь теплотехническими расчетами. Для районов, где глубина промерзания не превышает 2,5 м, нормативное значение можно рассчитать, пользуясь формулой:

$$d_{fn} = d_0\sqrt{M_t}, \quad (24)$$

где M_t - безразмерный коэффициент, вычисляющийся, как сумма среднемесячных отрицательных температур за зимний период в данном районе, Данные температуры принимаются по СНиП по строительной климатологии и геофизике, в случае если данные для конкретного района отсутствуют - берутся данные наблюдений гидрометеорологической станции, находящейся в аналогичных

условиях с районом строительства; d_0- величина, принимаемая равной, м, для: суглинков и глин - 0,23; супесей, песков мелких и пылеватых - 0,28; песков гравелистых, крупных и средней крупности - 0,30; крупнообломочных грунтов - 0,34.

Расчет сезонной глубины промерзания производят по формуле:

$$d_f = k_h d_{fn}, \quad (25)$$

где dfn - нормативная глубина промерзания ;

k_h - коэффициент, учитывающий влияние теплового режима сооружения, принимаемый: для наружных фундаментов отапливаемых сооружений - по Таблице 2.2

Для наружных и внутренних фундаментов неотапливаемых сооружений k_h = 1,1, кроме районов с отрицательной среднегодовой температурой. Приведенные в Таблице 2.2 значения коэффициента k_h относятся к фундаментам, у которых расстояние от внешней грани стены до края фундамента a_f< 0,5 м; если a_f> 1,5 м, значения коэффициента kh повышают на 0,1, но не более чем до значения k_h=1. При промежуточном значении a_f значения коэффициента k_h определяют интерполяцией. К помещениям, примыкающим к наружным фундаментам, относятся подвалы и технические подполья, а при их отсутствии – помещения первого этажа. При промежуточных значениях температуры воздуха коэффициент k_h принимают с округлением до ближайшего меньшего значения, указанного в таблице.

Таблица 2.2

Коэффициент k_h при расчетной среднесуточной температуре воздуха в помещении, примыкающем к наружным фундаментам, °С

Особенности сооружения	Коэффициент k_h				
	0 °С	5 °С	10 °С	15 °С	20 °С и

					более
По грунту	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
На лагах по грунту	1	0,9	0,8	0,7	0,6
По утепленному цокольному перекрытию	1	1	0,9	0,8	0,7
С подвалом или техническим подпольем	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4

Выводы по главе 2

На сегодняшний день не существует ни одного точного метода неразрушающего контроля для определения глубины промерзания грунта. Расчетный метод хоть и позволяет без непосредственного контакта определить глубину сезонного промерзания, но тем не менее дает лишь приблизительные оценки и охватывает слишком большие площади. Прочие методы, несмотря на то, что дают хороший результат, являются весьма финансово- и энергозатратными. К тому же любой метод разрушающего контроля оставляет после себя значительные изменения в исследуемой среде.

3. ПРИНЦИПЫ БЕСКОНТАКТНОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТА

3.1 Ультразвуковые методы изучения акустических свойств горных пород

На практике нередко используют ультразвук для изучения таких свойств горных пород, как упругость и трещиноватость. Анализ образцов горных пород ведется в частотном диапазоне (более 20 кГц). Применение ультразвука для такого рода исследований горных пород позволяет получить достаточно высокую точность измерения ее акустических свойств. Ультразвуковой метод применяют как при лабораторных исследованиях, так и в полевых условиях.

Наиболее простым методом исследования является метод прозвучивания. При использовании импульсного излучения в образец подаются короткие упругие импульсы в виде пакета. После прохождения образца сигнал принимается и усиливается, затем поступает на регистрирующий прибор, который фиксирует время его прихода, амплитуду. Анализируя время прохождения при известных размерах образца, делают вывод о скорости распространения волн через образец.

Для использования схемы профилирования нужно расположить излучатель и приемник на одном профиле, в роли которой выступает образующая цилиндрического или призматического образца. Излучатель должен оставаться неподвижно, в то время как приемник перемещается по профилю, выдерживая постоянный шаг. Чтобы увеличить точность фиксирования вступления поперечной или продольной волн, используют принцип фазового коррелирования вступления волн. Это позволяет фиксировать не только первое вступление волны, но и следующей за ней волны.

Иммерсионная система при лабораторных исследованиях, включает в себя измерение скоростей распространения продольных и поперечных звуковых волн при критических углах (т.е. углах полного внутреннего отражения). Исследуемый образец помещают в сосуд с жидкостью, находящийся в промежутке между излучателем и приемником. На границе раздела воды и горной породы

излучаемая волна разбивается на 2 составляющие: продольную и поперечную. При изменении угла падения упругой ультразвуковой волны на образец (путем поворота образца) будет изменяться амплитуда отраженной волны, и при некотором значении угла θ1 продольная волна претерпит полное внутреннее отражение. В образце будет распространяться только поперечная волна. Увеличивая далее угол падения ультразвуковой волны на образец до значения θ2, добиваются полного внутреннего отражения поперечной волны. Углы θ1 и θ2 называются первым и вторым критическими углами. Зная скорость продольной волны в иммерсионной жидкости Сж, определяют скорости в образце.

Коэффициент затухания упругих волн является функцией частоты колебаний, то коэффициент затухания определяется по частоте.

Для вычисления коэффициента затуханий используют две методики:

1) по уменьшению амплитуды частотной составляющей спектра с увеличением расстояния;

2) по уменьшению максимальной амплитуды сейсмограммы (осциллограммы) с увеличением расстояния.

Точность измерения характеристик зависит от: неоднородности структуры горных пород; наличие слоев контактирующие с образцом, излучателем и приемником; изменение частотного спектра импульса при его распространении в образце; наличие дифракционного расхождения пучка; потери в электроакустическом тракте экспериментальной установки.

Точность определения продольной и поперечной волн 1-2% и характеристик затухания 10-20%. Самый распространенный метод изучения акустических характеристик горных пород - скважинный каротаж, скважинного прозвучивания, поверхностного профилирования.

Существует два вида *скважинного каротажа: интегральный*, измерение времени распространения упругой волны от источника находящегося на поверхности, до некоторой точки в скважине, и *дифференциальный*, измерение времени распространения упругой волны между несколькими точками внутри скважины.

Так как обеспечить прохождение упругих волн на больших базах можно только используя сейсмический частотный диапазон, интегральный каротаж обычно называют сейсмокаротажем. При небольших базах измерения, которые свойственны дифференциальному каротажу, используют ультразвуковые или высокочастотные упругие колебания.

В случае ультразвукового или акустического каротажа в скважину опускают зонд, в который встроены излучатели и приемники, расположенные на одном профиле на определенном расстоянии друг от друга. На каждом приемнике фиксируется вступление и амплитуды волн, и их фазы, которые служат основой для построения скоростных и. амплитудных годографов. Зная разность времени пробега между двумя соседними приемниками (от одного излучателя) при малом расстоянии между ними, определяют истинную скорость распространения упругих волн.

В зависимости от способа контакта преобразователей с массивом в скважине регистрируются волны, представляющие собой следующие комплексы: при иммерсионном контакте — продольная или поперечная волна в околоскважинном массиве и волна в жидкости; при непосредственном контакте со стенкой скважины — продольная или поверхностная волна. По регистрации упругой волны несколькими приемниками рассчитывают коэффициент затухания.

Сущность измерений по методу скважинного прозвучивания заключается в том, что в массиве с поверхности пробуривается несколько скважин (или шпуров). В одну скважину помещается излучатель упругих колебаний (источник), в другую — приемники. При установке излучателя и приемников на одной высоте регистрируются прямые продольные волны. Если же приемники смещены в скважине относительно оси излучателя на угол 40—50°, то довольно просто одновременно определять два типа волн на сейсмограмме (осциллограмме) — продольную и поперечную. Причем амплитуда первой вступающей волны в этом случае обычно меньше, чем амплитуда поперечной. Выделение поперечной волны, кроме того, производится по отысканию точки на сейсмограмме, в которой резко меняется фаза прямой волны.

Метод скважиного прозвучивания (рис. 12) наиболее эффективен для оценки объемных акустических характеристик ненарушенного массива. Точность измерений акустических свойств горных пород в этом случае — наибольшая, и расшифровка получаемых данных — наиболее простая.

Скорости распространения упругих волн находятся по известной базе и измеренному времени распространения продольной и поперечной волн. Характеристика затухания упругих волн определяется по изменению максимальных амплитуд пришедших волн, измеренных на разных базах.

При изучении массива по методу скважинного прозвучивания расстояние между скважинами устанавливается в зависимости от мощности и частоты излучателя и поглощающих свойств массива с таким условием, чтобы можно было успешно регистрировать параметры упругих волн. При мощном источнике и частотах излучения 0,5—1 кГц расстояние между скважинами может быть более 50—100 м, при частотах 20—60 кГц оно может достигать 5—8 м в скальных породах.

3.2 Идея эксперимента по определению глубины промерзания грунта.

На основе данных об исследовании горных пород ультразвуковыми колебаниями возникла идея определения глубины промерзания с помощью подобного эффекта.

Первоначально предполагалось использовать свойства ультразвука отражаться от поверхности раздела двух сред, чьи волновые сопротивления различаются. Волновое сопротивление в акустике - это отношение звукового давления в бегущей плоской звуковой волне к колебательной скорости частиц среды. Оно вычисляется, как произведение плотности среды и скорость звука в ней. Волновое сопротивление в твёрдых телах для продольных волн отношение механического напряжения, взятого с обратным знаком, к колебательной скорости частиц среды.

Поскольку скорость звука в воде (1403 м/с при 0 °С) примерно в 2 раза меньше скорости звука во льду (3980 при -4 °С), то звуковая волна должна отразиться от границы раздела мерзлого и талого грунта. Анализируя время прихода сигнала можно сделать вывод о том насколько далеко находится граница раздела мерзлый - талый грунт, т.е. насколько далеко находится глубина промерзания грунта.

$$d_f = \frac{v_{\text{мг}} \cdot t_{\text{пр}}}{2}, \tag{26}$$

где d_f - глубина промерзания грунта, м

$v_{\text{мг}}$- скорость звука в мерзлом грунте, м/с

$t_{\text{пр}}$- время прохода ультразвуковой волны в прямом и обратном направлении, с

Однако на данном этапе работы этот реализовать данный метод не представлялось возможным, поскольку требует больших финансовых затрат и гораздо более точно проработанной методики измерения. Для реализации подобного эксперимента необходимы ультразвуковые датчики с разрешающей способностью не менее 10^{-7}с, так как, если принять скорость звука в мерзлом грунте равной скорости звука во льду, то оттаивание грунта на 20 см изменит время прихода сигнала лишь на $5 \cdot 10^{-6}$с.

В рамках этой работы было решено определять положение границы раздела мерзлой и талой зон в грунте используя разность в поглощении упругих звуковых колебаний твердой мерзлой и рыхлой талой среды.

3.3 Описание экспериментальной установки

Для исследования возможности определения глубины промерзания грунта была сконструирована экспериментальная установка, схема которой изображена на Рисунке 3.1.

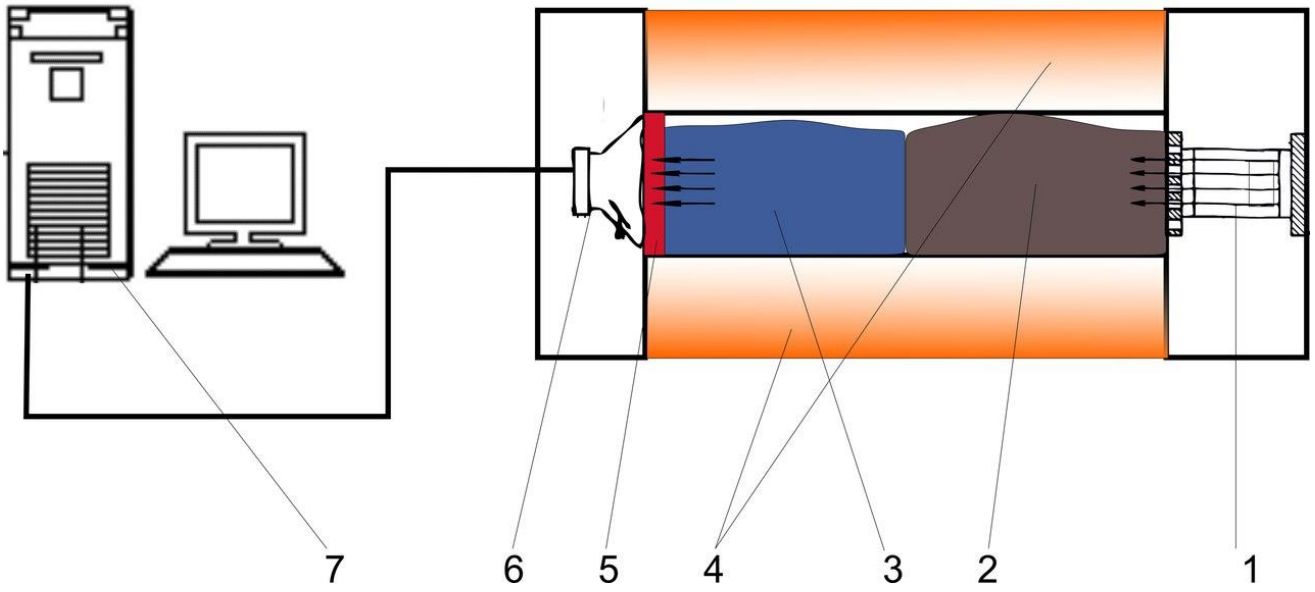

Рисунок 3.1 Схема экспериментальной установки.

Источник ультразвуковых колебаний 1 непрерывно излучает сигнал в трубку с грунтом. Сначала колебания проходят мерзлую зону 2, затем талую. Часть ультразвуковых колебаний поглощается грунтом в зависимости от соотношений размеров талой и мерзлой зон.

С другого конца трубки расположены нагревательный элемент 5 и приемник сигнала 6. Нагревательный элемент, выполненный в виде плоской металлической пластины с разъемом под приемник ультразвукового излучения служит для того, чтобы прогревать исследуемый грунт с одного конца трубки, тем самым отодвигая границу раздела двух зон в сторону излучателя с течением времени. Для того, чтобы грунт оттаивал с одной стороны, труба с грунтом защищена слоем теплоизолирующего материала 4.

Ультразвуковая волна доходящая до приемника 6, представляющего из себя пьезоэлектрический преобразователь, возбуждает в нем электрические колебания, которые передаются на регистрирующее устройство 7.

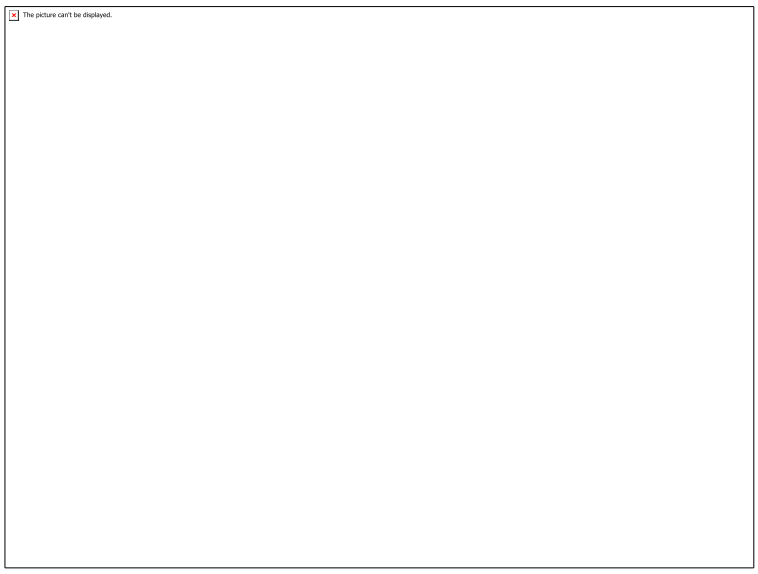

Рисунок 3.1 Пьезоэлектрические преобразователи ПП-203

В качестве источника и приемника ультразвуковых колебаний использовались пьезоэлектрические преобразователи ПП-203, с номинальной рабочей частотой 1,5 МГц. (Рисунок 3.1)

Принцип их работы основан на прямом и обратном пьезоэффекте. В качестве источника высокочастотных электромагнитных колебаний, подаваемых на пьезопреобразователь, выступающий в качестве источника, использовался генератор сигналов высокочастотный Г4-102. (Рисунок 3.4)

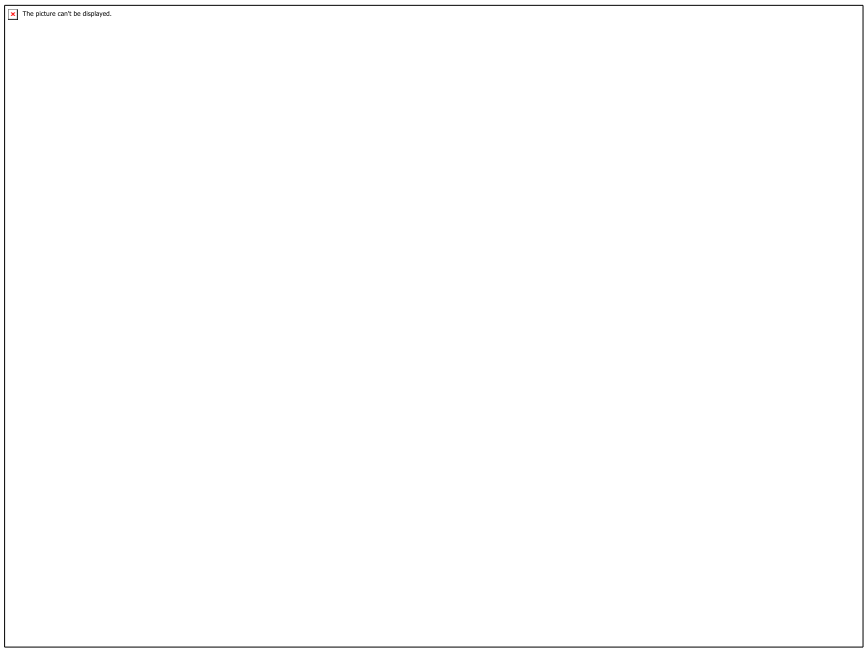

Рисунок 3.4 Генератор импульсов высокочастотный Г4-102.

К его преимуществам стоит отнести высокое разрешение настройки частоты выходного СВЧ сигнала. Однако напряжения его сигнала не было достаточным для того, возбуждения в пьезоизлучателе колебаний достаточной амплитуды. Амплитуда напряжения СВЧ сигнала с генератора колеблется около величины 1В, в зависимости от частоты излучения, для нужной для данной задачи частоты 1,5 МГц, состоавляет 0,7 В, очевидно, что оно является недостаточным.

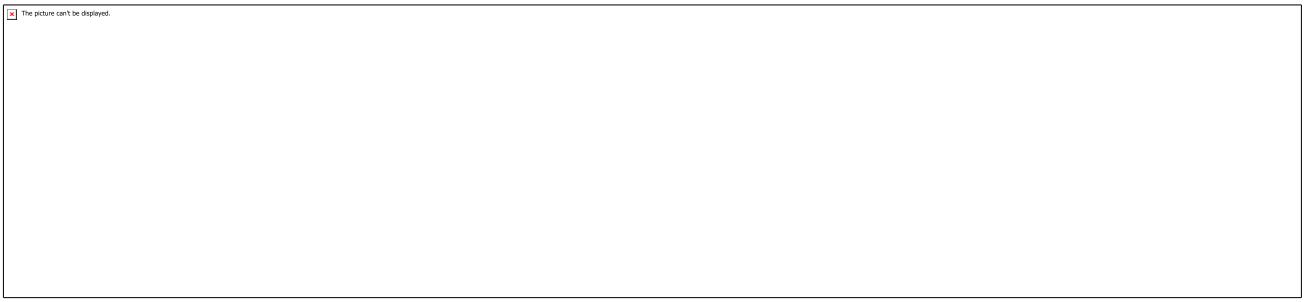

Рисунок 3.5 Схема многокаскадного транзисторного усилителя

Для решения этой проблемы был собран многокаскадный усилитель мощности на биполярном транзисторе по схеме включения с общим эмиттером (Рисунок 1.5 и Рисунок 1.6). В качестве усилительного транзистора был выбран биполярный транзистор 2SC945.

Рисунок 3.6 Схема одного каскада транзисторного усилителя

Сигнал поступающий на приемник излучения проходит фильтр низких частот, чтобы исключить внешние помехи и наводки. Затем отфильтрованный сигнал попадает на цифровой осциллограф, выступающий в роли измерительного прибора.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Измерения проводились для двух вариантов длин труб: 20 см и 60 см. Трубы заполнялись песком смешанным с водой в пропорции 2:1. Грунт подвергался полной заморозке, затем грунт, благодаря нагревательному элементу установленному с одной стороны, постепенно оттаивал. В процессе оттаивания измерялись амплитуды сигнала на приемнике и излучателе. Внешний вид установок изображен на Рисунке 4.1 и 4.2

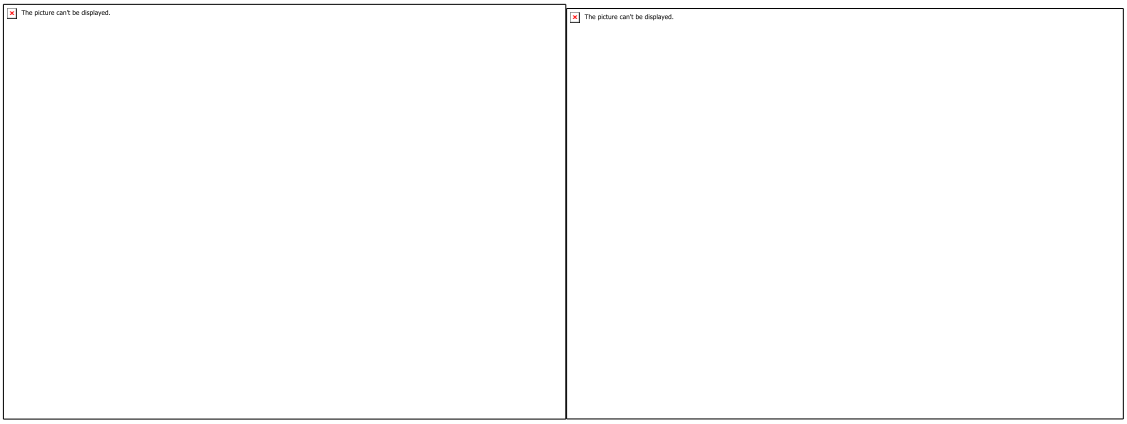

Рисунок 4.1 Внешний вид установки (короткая трубка)

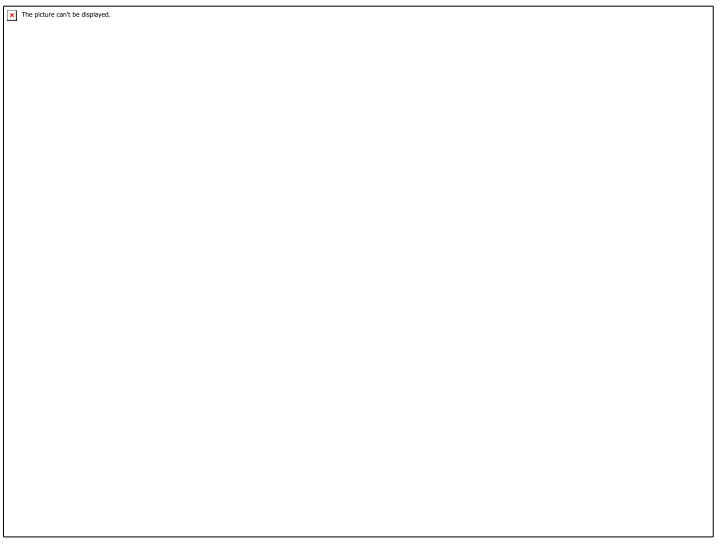

Рисунок 4.2 Внешний вид установки (длинная трубка)

Амплитуда напряжения подаваемое с усилителя на излучатель (входное напряжение): 20В. По мере оттаивания грунта величина выходного напряжения снимаемого с пьезоизлучателя выступающего в качестве приемника уменьшалась.

На основе полученных данных построены графики зависимости амплитуды выходного сигнала от положения границы раздела мерзлой и талой зон грунта. (Таблица 4.1, Рисунок 4.3).

Таблица 4.1

Результаты эксперимента (короткая труба)

d, см	0	5	10	15	20
Uвых	320	235	205	165	150

Рисунок 4.3 График зависимости выходного напряжения от расстояния до границы раздела талой и мерзлой зон грунта. (короткая труба)

Пример получаемых в эксперименте осциллограмм выходного сигнала изображен на Рисунке 4.4.

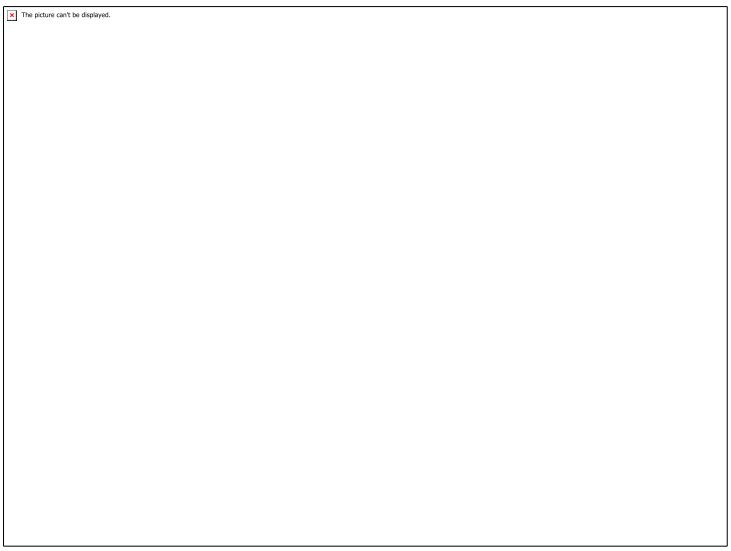

Рисунок 4.4 Внешний вид получаемых осциллограмм

Аналогичный результат был получен и для более длинной трубы с грунтом (60 см) (Таблица 4.2, Рисунок 4.5)

Таблица 4.2

Результаты эксперимента (длинная труба)

d, см	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Uвых	150	85	80	75	60	55	45	35	30	20	15	15	10

Рисунок 4.2 График зависимости выходного напряжения от расстояния до границы раздела талой и мерзлой зон грунта. (длинная труба)

По графикам четко прослеживается увлечение поглощения ультразвука по мере оттаивания образца грунта. Это дает нам основание считать, что прохождение ультразвука через мерзлый грунт, может быть использовано в качестве основы бесконтактного определения глубины промерзания грунта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Среди известных методов определения положения границы промерзания влажных грунтов наиболее распространены технологии, разрушающие целостность грунтового массива, что затрудняет дальнейшие исследования и способствует заводнению и засолению грунта, снижает его несущую способность.

В результате проведённого анализа методов неразрушающего контроля горных пород и грунтов выделен ультразвуковой метод, используемый для изучения структуры и акустических свойств в том числе определение модуля Юнга, коэффициента Пуассона, предела разрушения образцов и сжимаемость порового пространства. Данный метод обладает рядом преимуществ и был рассмотрен нами как основа технологии для определения глубины промерзаниях грунта, важнейшей задачи при проектировании и строительстве инженерных объектов на мёрзлых и протаивающих грунтах.

Из двух способов исследования ультразвуком грунта: пропускание или отражение, был выбран способ пропускания сигнала через грунт с последующей регистрацией проходящей волны. Что представляется более удобным в лабораторных исследованиях. В ходе работы опытным путём было исследовано поглощение ультразвуковых колебаний во мерзлом и талом грунте с подвижной границей фазового перехода. Получены эмпирические зависимости величины пропускания ультразвукового сигнала от глубины промерзания. Установлено, что величина поглощения ультразвукового сигнала талым грунтом, по мере оттаивания возрастает.

Полученные результаты доказывают практическую возможность использования ультразвукового метода для определения глубины промерзания водонасыщеного грунта, при влажности выше 30%. При дальнейшем совершенствовании данной технологии этот метод обещает стать более эффективным и менее дорогостоящим чем существующие на сегодняшний день.

Дальнейшее развитие исследований состоит в развитии технологии: изучение отражения ультразвуковых волн в мерзлом грунте от границы раздела,

что может выступить основой для создания устройства для полевых исследований мерзлого грунта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Биполярный транзистор, расчёт транзисторного каскада (Электронный ресурс) // Практическая электроник - Режим доступа: http://www.meanders.ru/tranzistors.shtml
2. Велли Ю.Я. Здания и сооружения на крайнем севере / Ю.Я. Велли, В.В. Докучаев, Н.Ф. Федоров // Ленинград: Госстройиздат, 1963. - 492 с.Стандартинформ, 2014. - 11 с
3. ГОСТ 24847-81 Грунты. Методы определения глубины сезонного промерзания.-М.:Издательство стандартов, 1981.
4. ГОСТ 25358-2012 Грунты. Метод полевого определения температуры.-Стандартинформ, 2013.
5. ГОСТ 26262-2014 Грунты. Методы полевого определения глубины сезонного оттаивания.-М.:
6. Далматов Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты (включая специальный курс инженерной геологии) - 2-е изд. перераб. и доп. / Б.И. Далматов // Л.: Стройиздат, 1988. - 415 с. с илл.
7. Крамаренко В.В. Практикум по мерзлотоведению: Учебное пособие / Т.Я. Емельянова, В.В. Крамаренко // ; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 120 с.
8. Пьезоэлектрические преобразователи (Электронный ресурс) // Преобразователи, датчики, сенсоры - Режим доступа: http://sensorse.com/page19.html
9. СНиП II-Б.1-62. Строительные нормы и правила. Часть II, раздел Б. Глава 1. Основания зданий и сооружений. Нормы проектирования. М.: Издательство стандартов, 1962.
10. СНиП 23-01-99*. Свод правил. Строительная климатология. Актуализированная версия. М.: Издательство стандартов, 2012.
11. Ультразвуковые методы изучения акустических свойств горных пород (Электронный ресурс) // Строительный вестник - Режим доступа: http://ctc-

metar.ru/volnovye-processy/9308-ultrazvukovye-metody-izucheniya-akusticheskih-svoystv-gornyh-porod.html

12. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: Пер. с англ. - Изд 2-е. / П. Хоровиц, У. Хилл / М.:Издательство БИНОМ., 2014 - 704 с. с илл.
13. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов: Учебное пособие / Н.А. Цытович // М.: “Высшая школа”, 1973. - 448 с. с илл.