



СИБИРСКИЙ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ

SIBERIAN
FEDERAL
UNIVERSITY

Г. И. Кузнецов, Н. В. Крук,
Д. А. Озерский

ПРОМЫШЛЕННЫЕ БАССЕЙНЫ В КРИОЛИТОЗОНЕ

УДК 551.34
ББК 26.36
К891

Рецензенты:

С. Г. Федоров, главный инженер Красноярского треста инженерно-строительных изысканий;

В. Ф. Кошкин, кандидат геолого-минералогических наук, главный геолог АО «Красноярская горно-геологическая компания»

Кузнецов, Г. И.

К891 Промышленные бассейны в криолитозоне : монография / Г. И. Кузнецов, Н. В. Крук, Д. А. Озерский. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2022. – 356 с.
ISBN 978-5-7638-4618-8

Обобщен опыт строительства и эксплуатации промышленных бассейнов в криолитозоне России, а также приведены результаты натурных исследований, новые конструктивные решения по формированию криогенно-температурного режима вечномерзлого основания. Рассмотрены теплофизические основы работы специальных гидротехнических сооружений – золоотвалов, хвостохранилищ, шламонакопителей, предложены рекомендации по их возведению и эксплуатации в условиях криолитозоны.

Предназначена для научных сотрудников, инженеров-гидротехников, проектирующих и эксплуатирующих гидроузлы в районах криолитозоны, и специалистов по техносферной безопасности.

Электронный вариант издания см.:
<http://catalog.sfu-kras.ru>

УДК 551.34
ББК 26.36

ISBN 978-5-7638-4618-8

© Сибирский федеральный университет, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	6
1. Природные условия криолитозоны.....	7
1.1. Особенности и распространение вечномерзлых грунтов	7
1.2. Температурный режим вечномерзлых грунтов	11
1.3. Состав и строение мерзлых грунтов	14
1.4. Процесс замерзания грунтовой влаги	22
1.5. Содержание незамерзшей воды в мерзлых грунтах	26
1.6. Основные физические свойства мерзлых грунтов	30
1.7. Подземные воды криолитозоны	35
1.8. Криогенные процессы в естественных условиях	39
2. Проектирование промышленных бассейнов.....	51
2.1. Назначение промышленных бассейнов, их технические и природоохранные функции	51
2.2. Технологии складирования зернистых отходов и стоков в промышленные бассейны	55
2.3. Классификация и состав сооружений промышленных бассейнов	57
2.4. Критерии надежности и экологической безопасности промышленных бассейнов	60
2.5. Основные задачи проектирования.....	63
3. Конструкции и технологии возведения сооружений промышленных бассейнов	73
3.1. Гидроотвалы в суровых климатических условиях	73
3.2. Насыпные накопители в суровых климатических условиях	94
3.3. Накопители в карьерных выработках	104
4. Фильтрационные расчеты промышленных бассейнов.....	113
4.1. Задачи фильтрационных расчетов.....	113
4.2. Фильтрационные характеристики грунтов.....	115
4.3. Расчеты без учета фильтрационного сопротивления намывных и насыпных отходов для начального периода эксплуатации	125
4.4. Накопитель с однослойным грунтовым экраном.....	131
4.5. Фильтрационные расчеты накопителей с грунтовыми противофильтрационными экранами	132
4.6. Фильтрация из неэкранированного накопителя.....	139

4.7. Локальные утечки по трещинам в экранах.....	141
4.8. Водопроницаемость пленочных экранов.....	145
4.9. Расчет фильтрации в неэкранированных дамбах на проницаемом основании ограниченной мощности	149
4.10. Расчет фильтрации в насыпных экранированных дамбах на проницаемом основании ограниченной мощности	153
4.11. Расчет фильтрации в глинистых экранах	158
5. Методы регулирования тепловых и фильтрационных процессов в сооружениях промышленных накопителей	162
5.1. Мерзлотные противофильтрационные и упрочняющие завесы	162
5.2. Тепловой режим вечномерзлого основания многосекционного промышленного бассейна.....	170
5.3. Устройство незамерзающих дренажей	176
6. Проектирование противофильтрационных мерзлотных завес в промышленных бассейнах мерзлого типа.....	190
6.1. Особенности функционального охлаждения грунтов	190
6.2. Термосифоны. Конструкции и принципы работы	196
6.3. Расчет температуры теплоносителя в термосифонах.....	207
6.4. Расчет времени замораживания грунта	211
6.5. Основы расчета и проектирование жидкостных термосифонов ...	213
6.6. Инженерная методика расчета жидкостных термосифонов	219
6.7. Расчет замораживания грунтов жидкостными термосифонами	224
6.8. Способы устранения летней циркуляции теплоносителя.....	227
6.9. Опыт практического применения жидкостных термосифонов ...	230
6.10. Сравнительная оценка тепловой эффективности термосифонов	251
6.11. Теплотехнический расчет при замораживании и оттаивании грунтов при воздушном охлаждении	253
7. Криогенные и фильтрационные процессы при эксплуатации промышленных бассейнов	258
7.1. Техногенные формы гидротепловой эрозии и термокарста, комплексные формы фильтрационных и криогенных деформаций на промышленных бассейнах	258
7.2. Особенности развития криогенных процессов при эксплуатации промышленных бассейнов	266
7.3. Специальные вопросы устойчивости откосов ограждающих дамб промышленных бассейнов	273
7.4. Методы подготовки оснований промышленных бассейнов	292

7.5. Криогенные и гидромеханизированные технологии экранирования накопителей	302
8. Натурные наблюдения и исследования накопителей промышленных бассейнов	317
8.1. Состав и организация наблюдений	317
8.2. Контрольно-измерительная аппаратура.....	320
8.3. Анализ результатов и комплексная оценка состояния промышленных бассейнов	332
Заключение.....	337
Библиографический список.....	339
Приложения	345

1. ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ

В соответствии с современными представлениями понятие «грунты» включает в себя все горные породы (включая лед и почвы), которые изучаются как многокомпонентные системы, изменяющиеся с течением времени, с целью их использования в техногенной деятельности.

Методологической основой изучения грунтов является их генезис, т. е. условия происхождения, формирующие физико-механические свойства и особенности их поведения при нагрузках.

1.1. Особенности и распространение вечномерзлых грунтов

Определение термина «мерзлый грунт» формировалось постепенно, по мере накопления экспериментальных данных о свойствах мерзлых грунтов. Согласно современным представлениям, в том числе определениям, принятым в нормативных документах, мерзлыми называются грунты, имеющие отрицательную температуру и содержащие лед. Скальные грунты, которые имеют отрицательную температуру и не содержат льда, классифицируются как *немерзлые*. Крупнообломочные и мелкодисперсные грунты с отрицательной температурой, но не сцементированные льдом, из-за их низкой влажности называются *сытучемерзлыми*. Морозные сыпучемерзлые грунты незначительно отличаются по физико-механическим свойствам от грунтов с положительной температурой, поэтому здесь в основном рассматриваются мерзлые грунты, частицы которых склеены льдом [10, 54, 56].

Одним из основных классификационных показателей мерзлых грунтов является криогенная текстура (табл. 1.1), которая формируется в зависимости от условий промерзания, главным образом от значений градиентов температуры и влажности.

В зависимости от объема содержания льда различают следующие категории мерзлых грунтов [52]:

- ◆ сильнольדיстые (содержание льда более 50 %);
- ◆ льдистые (содержание льда 25–50 %);
- ◆ слабольдистые (содержание льда менее 25 %).

Таблица 1.1

Виды криогенных текстур мерзлых грунтов

Криогенная текстура	Характер расположения ледяных включений
Массивная	Лед содержится только в порах грунта. Видимых прослоек льда нет
Слоистая	Лед (прослойки) содержится в виде отдельных включений различных размеров, ориентированных примерно в одном направлении
Сетчатая	Лед содержится в грунте в виде пересекающихся прослоек различной ориентации
Корковая	Лед образует корки и линзы вокруг обломков в крупнообломочном грунте

Сильнольдистые характеризуются повышенной сжимаемостью в мерзлом состоянии, а при оттаивании они приобретают текучую, текучепластичную или пластичную консистенцию, что вызывает их просадочность. Эти грунты характеризуются очень низкой несущей способностью в оттаявшем состоянии и высокой сжимаемостью и имеют незначительное количество ледяных включений. Во время оттаивания мелкодисперсные слабльдистые грунты (глинистые, суглинистые, пыльные) обычно приобретают тугопластичную или полутвердую консистенцию и обладают относительно низкой сжимаемостью. Лдьистые грунты обладают промежуточными свойствами между сильно и слабльдистыми.

По состоянию мерзлых грунтов они делятся на две группы:

- ◆ твердомерзлые – прочно сцементированы льдом, практически несжимаемые.
- ◆ пластично-мерзлые, содержащие большое количество незамерзшей воды, в результате чего в них появляются пластические деформации.

Показателем границы твердомерзлого и пластично-мерзлого состояния является коэффициент уплотнения. Эта величина для твердомерзлых грунтов равна или меньше $0,001 (10^5 \text{ Па})^{-1}$, для пластичномерзлых – больше [60].

Твердомерзлое состояние обычно достигается при понижении температуры, тогда большая часть содержащейся в них воды замерзает. Эти грунты характеризуются температурами, при которых они находятся в твердом замороженном состоянии: для пылеватых песков – $0,3^\circ\text{C}$, для

супесей – 0,6 °С, суглинков – 1,0 °С и для глин – 1,5 °С. Эти температурные пределы очень приблизительны и, как показывают недавние эксперименты, завышены, т. е. пластично-мерзлое состояние наблюдается при температуре ниже вышеуказанного предела.

Температурный предел твердомерзлого состояния для засоленных грунтов всегда ниже значений, указанных выше, и в каждом конкретном случае определяется в зависимости от содержания солей и их химического состава. Категории засоленности грунтов приведены в [16] в зависимости от отношения массы солей к массе сухого грунта.

Содержание биогенных остатков в грунтах характеризуется заиленностью или заторфованностью. В отношении мерзлых грунтов, содержащих растительные остатки, была составлена классификация торфяных грунтов с их разделением на виды, типы и подтипы. Установлено, что незначительное количество растительных остатков (3 % в песчаных грунтах, 5 % по массе в глинистых грунтах) обуславливает необходимость их учета при рассмотрении физико-механических свойств [48].

При оценке мерзлых грунтов фундаментов зданий и сооружений очень важен период их нахождения в мерзлом состоянии. Названия мерзлых грунтов на этом основании еще не нашли окончательного выражения (основные из них: многолетние мерзлые – годы, сотни и тысячи лет, вечная мерзлота – века, тысячелетия и т. д.). В данной монографии мы будем придерживаться терминов, приведенных в нормативном документе [60].

Вечномёрзлые грунты занимают обширные территории Азии, Северной Америки, Антарктиды, встречаются они и в Европе. Общая площадь распространения вечномёрзлых грунтов составляет 35,17 млн км² (23 % земной суши, из них 11 млн км² – в бывшем СССР). На территории Российской Федерации вечномёрзлые грунты занимают около 2/3 территории, при этом область их распространения простирается до островов Северного Ледовитого океана. Они захватывают большую глубину (примерно 1–3 м), а глубже (до 50–100 м) находятся постоянно (веками) в мерзлом состоянии. Вечномёрзлые грунты имеют мощность от нескольких метров до 1,5 км, залегая на глубине от 0,5 до 1,0 м на севере и до 3,0–4,5 м на юге. Расстояние от верхней до нижней границы вечномёрзлой толщи и определяет ее мощность [57].

В зависимости от характера распространения вечной мерзлоты по площади выделяют зоны сплошного, прерывистого и островного развития. Сплошное распределение мерзлых пород характерно для северных регионов, но под водоохранилищами или в районах интенсивного

стока подземных вод, встречаются талики, количество и площадь распространения которых увеличиваются с севера на юг.

Характерное температурное поле и изменение амплитуды колебаний температуры многолетнемерзлых пород по глубине для случая их непрерывного залегания показаны на рис. 1.1. В пределах сезонно оттаивающего слоя в зависимости от времени температура меняется от положительной до отрицательной. При этом амплитуда колебания температуры для слоя сезонного оттаивания тем больше, чем континентальнее район расположения вечномерзлых пород. Ниже слоя сезонного

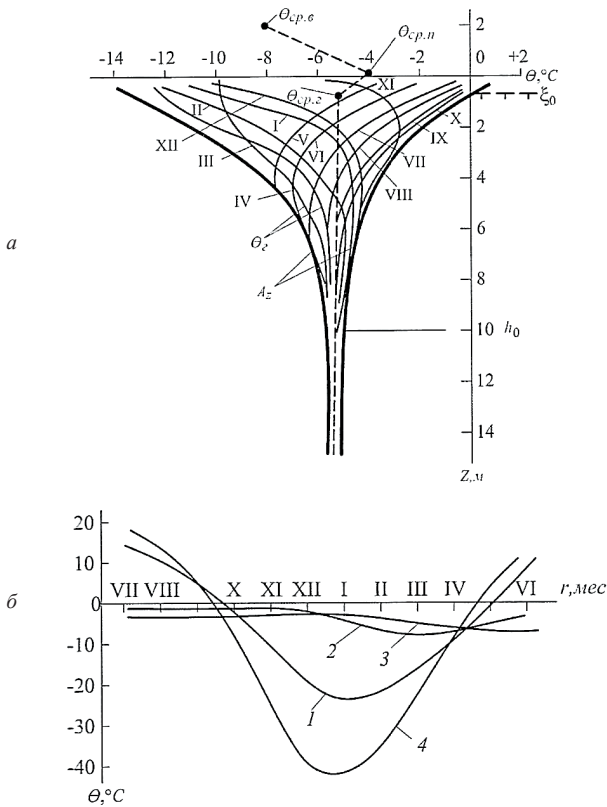


Рис. 1.1. Изменение температуры мерзлых грунтов v , по глубине z и месяцам года (a), амплитуда их колебаний (b) [12]: A_z – по глубине (огibaющие кривые), среднегодовых температур воздуха; $\theta_{cp,v}$ – поверхности грунта; в $\theta_{cp,r}$ (a) и температуры пород во времени (b) на глубине 0,4 м (1), 2 м (2), 2,4 м (3) и в воздухе (4); ξ_0 – глубина сезонного оттаивания

оттаивания до глубины h_0 температура грунтов, оставаясь отрицательной, меняется в течение года.

Глубина h_0 называется нулевым уровнем годовой амплитуды. Она зависит от континентальности и геологических условий местности, среднее значение h_0 принимается равным 10 м в нормативных документах. Температура на этой глубине принимается равной среднегодовой температуре грунта и рассчитывается при определении глубины оттаивания, а также при прогнозе температурного режима оснований сооружений и других тепловых расчетах.

Ниже уровня нулевой годовой амплитуды с глубиной обычно наблюдается постепенное повышение температуры, это связано с влиянием геотермального градиента, равного ≈ 3 °C на 100 м глубины. Следует отметить, что в нижней зоне пластов горных пород, имеющих отрицательную температуру, некоторый слой грунтов может находиться в оттаявшем состоянии из-за высокого давления, понижающего температуру кристаллизации. Этот слой грунтов содержит только переохлажденную воду без кристаллов льда. Слои почв с переохлажденной водой также могут образовываться под влиянием снижения температуры замерзания грунтовой влаги из-за содержания растворимых солей. Солевые растворы с отрицательной температурой называются криопегами.

Таликовые зоны с отрицательной температурой, а также слой летнего оттаивания и глубина зимнего промерзания в районах вечномерзлых пород являются важными характеристиками вечномерзлых толщ. Это определяющие факторы при строительстве сооружений, а также в выборе технологий при строительстве зданий и сооружений.

Следует отметить, что мерзлое состояние пород и их температурный режим не постоянны, а меняются одновременно с изменением уровня теплообмена на поверхности Земли, т. е. с изменением климата. Причинами потепления и похолодания служат как внешние (космические), так и внутренние (земные) факторы. Рассмотрим один из земных факторов – влияние застройки территории и самих зданий при их эксплуатации.

1.2. Температурный режим вечномерзлых грунтов

Температура вечномерзлых грунтов, как об этом было сказано выше, – один из решающих факторов, определяющих пригодность мерзлых грунтов в качестве оснований зданий и сооружений.

В процессе понижения температуры мерзлого грунта, даже после практически полного его замерзания (для песков ниже $-2\dots-30$ °C, для

глин ниже $-10...-20\text{ }^{\circ}\text{C}$), прочность грунта возрастает. В то же время с повышением температуры мерзлого грунта прочность его уменьшается. Особенно заметно влияние температуры мерзлого грунта на его прочность при температурах, близких к нулю.

Температура вечномерзлых грунтов в пределах глубины заложения фундамента не остается постоянной в течение года. По глубине вечномерзлую толщу грунта по температурному признаку можно разделить на две зоны (рис. 1.2): зону аккумуляции, характеризующуюся сезонными колебаниями температуры, и зону нулевых годовых амплитуд с постоянной, не изменяющейся в течение года температурой.

Ниже верхней границы вечномерзлой толщи температура грунта изменяется, но всегда остается ниже нуля градусов. Начиная с некоторой глубины, температура мерзлого грунта остается постоянной в течение года. Для инженерной практики можно считать температуру грунта постоянной на глубине 10–15 м (в строительных нормах – 10 м). На этой глубине при инженерных изысканиях и определяют разовым замером среднегодовую температуру вечномерзлого грунта.

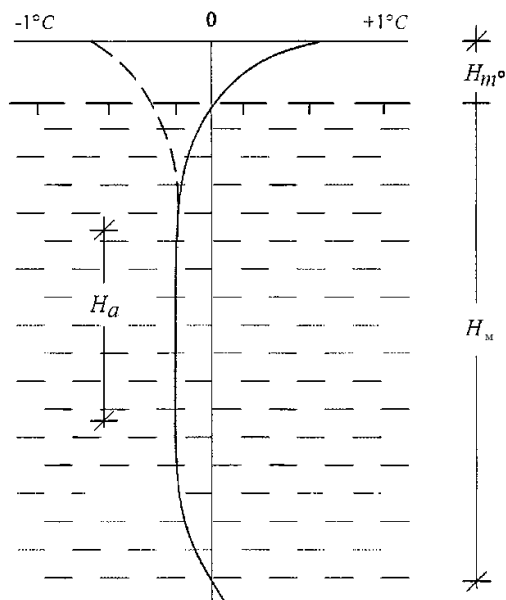


Рис. 1.2. Схематический температурный разрез толщи мерзлых грунтов: H_T – глубина сезонного протаивания; H_m – мощность мерзлой толщи; $t\text{ }^{\circ}\text{C}$ – температура; H_a – зона аккумуляции температуры

Характер температурных колебаний вечномерзлых грунтов представлен на рис. 1.2, на котором видно, что распределение среднемесячных температур вечномерзлых грунтов, их изменения в течение года происходят в зоне аккумуляции.

От географического расположения района строительства, метеорологических факторов, снегоотложений, времени года, глубины от поверхности грунта и других условий тепло- и массообмена зависят период и амплитуда температурных колебаний вечномерзлых грунтов. В то же время колебания величины среднегодовой температуры наружного воздуха мало сказываются на изменении температур грунта в зоне аккумуляции, однако существенно влияют на глубину сезонного оттаивания и промерзания.

Разница между среднегодовой температурой воздуха данного района и температурой в зоне нулевых годовых амплитуд не превышает $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Изменения температурного режима грунтов, связанные с естественным изменением климата и геологическими процессами, происходят крайне медленно по сравнению со сроком эксплуатации здания или сооружения, поэтому не имеют практического значения. В то же время необходимо иметь в виду, что в результате эксплуатации зданий и сооружений среднегодовая температура вечно-мерзлого грунта в пределах заложения фундаментов изменяется по сравнению с измеренной в естественных условиях.

На рис. 1.3 показана эпюра распределения температур по глубине грунта под зданием, по которой видно, что величина среднегодовой температуры (под центром здания) характеризуется эпюрой, составленной кривыми шах и min температур. Чем больше площадь эпюры и ниже величина $t_{\text{ср}}$ тем жестче температурный режим, а следовательно, и надежная работа грунта как основания сооружения.

Способность основания к восприятию известного количества теплопоступлений от здания характеризуется наличием «запаса избыточного холода», выражаемого частью площади эпюры, численно равной разности площади СДВК и ОВД.

Чем больше этот «запас», тем большее количество избыточного тепла может быть воспринято основанием безболезненно для сооружения. Приблизительно качество основания может быть охарактеризовано непосредственно величиной среднегодовой температуры грунта (см. рис. 1.1, *a*).

Не останавливаясь подробно на закономерности формирования температур грунта в основании зданий и других тепловыделяющих сооружений, о чем более подробно изложено в специальной литературе

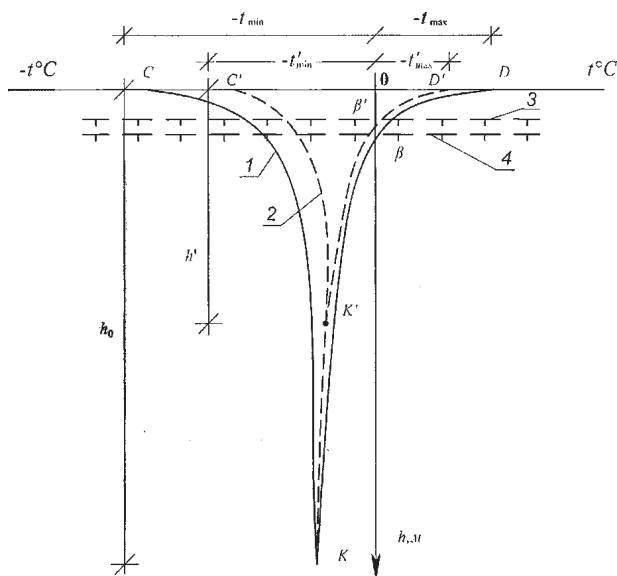


Рис. 1.3. Эпюра распределения температур по глубине грунта: 1 – в естественных условиях; 2 – под зданием после застройки. Глубина залегания кровли ММП: 3 – под зданием после застройки; 4 – в естественных условиях

и других источниках, отметим, что одним из критериев процесса формирования терморезима является динамика изменения среднегодовых температур грунта в их основании за счет теплового влияния здания.

Из сказанного выше можно сделать вывод, что при проектировании фундаментов для определения их несущей способности по грунту основания необходимо исходить из температур грунтов, формирующихся в зоне аккумуляции, и максимальных температур. Величина максимальных среднегодовых температур принята нормами [60] в качестве одной из основных характеристик при назначении расчетных сопротивлений мерзлых грунтов.

1.3. Состав и строение мерзлых грунтов

По агрегатному состоянию мерзлые грунты относятся к твердым телам. Однако по составу они являются многофазными, включая многообразные по физическо-химическим и механическим свойствам компоненты, находящиеся в различном фазовом состоянии (твердом, пластич-

ном, жидком, паро- и газообразном). Все компоненты мерзлых грунтов находятся в механическом, физическом и химическом взаимодействии, которое формирует физико-механические свойства, обуславливающие поведение мерзлых грунтов при внешних нагрузках. В связи с этим мерзлые грунты необходимо рассматривать как слоистую многофазовую систему, включающую [10, 56, 57]:

- ◆ твердые минеральные частицы;
- ◆ биогенные включения как растительного, так и животного происхождения;
- ◆ воду в связанном и свободном состояниях, которая может содержать растворенные соли, кислоты (щелочи);
- ◆ лед;
- ◆ газообразные компоненты (пары, газы).

Твердые минеральные частицы оказывают существенное влияние на механические свойства мерзлых грунтов. При этом большое значение имеют размеры и форма частиц, их компоновка, а также минеральный состав. Мерзлые грунты классифицируются так же, как и немерзлые: крупнообломочные, песчаные и глинистые (пески, супеси, суглинки, глины).

Дисперсность минеральных частиц в мерзлых грунтах обуславливает физико-химические поверхностные процессы, интенсивность которых зависит от удельной поверхности и минерального состава. Удельная поверхность дисперсных грунтов может составлять от нескольких квадратных метров на один грамм грунта. Например, в каолиновой глине удельная поверхность частиц близка к 10 м/г, а в монтмориллоновой она составляет около 800 м/г. Одни минералы (кварц, полевошпат) менее активно взаимодействуют с водой, другие (например, монтмориллонит, каолинит) – более активно, обладая значительной энергией химических связей с грунтовой влагой и льдом.

Существенное влияние на свойства мерзлых грунтов оказывает форма твердых минеральных частиц, которая в значительной мере определяет величину контактных усилий, передаваемых от внешней нагрузки.

Биогенные включения имеют меньшую прочность, чем минеральные частицы. Они обладают повышенной гидрофильностью, т. е. способны удерживать значительное количество влаги. Мерзлые грунты с биогенными остатками имеют повышенную льдистость и содержат больше незамерзшей воды. В связи с этим наличие биогенных включений в мерзлых грунтах приводит к снижению их прочности, появлению вязких деформаций под нагрузками.

Вода имеет исключительное влияние на механические свойства мерзлых грунтов, цементируя при замерзании минеральные и биогенные частицы, увеличивая в десятки раз прочность и вместе с тем обуславливая длительную ползучесть. Атомы в свободной молекуле воды образуют треугольник Н-О-Н с углом $104,5^\circ$. Расстояния О-Н и Н-Н равны 0,096 и 0,154 нм соответственно (рис. 1.4).

Вода характеризуется рядом аномальных свойств: при замерзании она увеличивается в объеме, ее плотность максимальная при температуре 4°C . Вязкость воды составляет около $1,8 \cdot 10^{-2}$ Па при температуре 0°C и $0,28 \cdot 10^{-2}$ Па при 100°C . Аномальные свойства воды обусловлены прочными водородными связями. При оттаивании льда разрывается всего около 12 % связей, что вытекает из соотношения теплоты плавления и сублимации льда (0,334 кДж; 2,834 кДж).

Условие одновременного равновесия между всеми тремя фазами (пар – жидкость – лед) характеризуется давлением $P = 4,579$ мм рт.ст. (610,5 Па) и температурой $\theta = 0,010^\circ\text{C}$. При 0°C и давлении 760 мм рт.ст. (~ 105 Па) лед находится в равновесии с водой, насыщенной воздухом. В естественных условиях свободная вода замерзает при температуре 0°C .

Температура замерзания влаги, находящейся в грунте, понижается в связи с тем, что она попадает в поле электромолекулярного взаимодействия с минеральными и биогенными частицами, кристаллами льда, растворенными слоями. По классификации А. Ф. Лебедева, в механике мерзлых грунтов вода подразделяется на свободную, рыхлосвязанную и прочносвязанную (см. рис. 1.4). Замерзание грунтовой влаги происходит в диапазоне отрицательных температур. В тонкодисперсных мерзлых грунтах практически всегда содержится определенное количество воды в жидкой фазе. Установлено, что при температуре начала замерзания грунтовой влаги в лед переходит свободная вода. Затем наблюдается постепенное замерзание рыхлосвязанной и частичное замерзание прочносвязанной воды.

В вечномерзлых грунтах незамерзающая вода при обычных отрицательных температурах (по крайней мере до температуры примерно -70°C) всегда содержится в том или ином количестве.

Незамерзающая вода в мерзлых или вечномерзлых грунтах может быть в двух состояниях:

- ♦ прочносвязанном поверхностью минеральных частиц (с избытком энергии активации), когда вследствие огромных электромолекулярных сил поверхности вода не может перейти в гексагональную кристаллическую решетку льда даже при очень низких температурах;

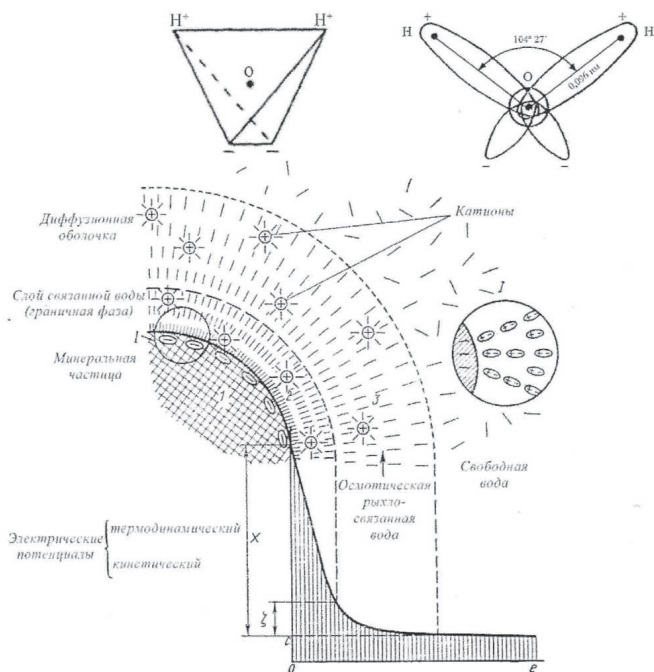


Рис. 1.4. Схема электромолекулярного взаимодействия поверхности минеральной частицы с водой [48]: 1 – минеральная частица; 2 – вода связанная; 3 – вода рыхлосвязанная (осмотическая)

- ♦ рыхлосвязанном – вода переменного фазового состава с недостатком энергии активации, выделяющая тепло кристаллизации при калометрировании и замерзающая при температуре ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, чем тоньше будут слои рыхлосвязанной воды, тем большее воздействие поверхности минеральных частиц грунта она будет испытывать, и температура замерзания её будет более низкой. Понижение температуры замерзания рыхлосвязанной воды происходит вследствие того, что между слоем связанной воды и воды свободной возникает слой менее связанной и более подвижной, как бы более «теплой воды», чем свободная вода, требующая больше энергии и более низкой температуры её кристаллизации.

Количество незамерзшей воды в мерзлых и вечномерзлых грунтах уменьшается с понижением отрицательной температуры грунта, причем

каждый грунт характеризуется вполне определенной кривой содержания незамерзшей воды [48].

Лед, содержащийся в мерзлых грунтах, называется подземным. При мгновенной нагрузке он ведет себя как идеально упругая среда, при длительной и постоянной нагрузке – как идеально вязкопластическая среда. В криолитозоне лед может быть как мономинеральная грунтовая толща, как лед-цемент, находящийся в порах грунтов, и как лед-включение, в виде прослоек.

В соответствии с классификацией П. А. Шуйского подземный лед образуется следующими основными способами: в процессе промерзания увлажненного грунта (конституционный лед); при заполнении подземных полостей (жильный и повторно-жильный лед); при погребении снега и льда грунтовыми слоями (погребенный лед) [59].

Конституционный лед является структуро- и текстурообразующим компонентом мерзлых грунтов.

Согласно опубликованным работам в геокриологии под структурой мерзлых грунтов следует понимать размер, форму, характер поверхности обломков и минералов горных пород, включений льда (льда-цемента и льда включений), их взаимное расположение и взаимосвязь. Текстура грунта, в том числе и многолетнемерзлого, – это видовая его характеристика. В связи с этим криогенной текстурой грунтов (рис. 1.5) обычно называют пространственное расположение в них включений льда [59].

В зависимости от ориентации прослоек льда различают слоистую (рис. 1.5, б) криогенную текстуру, когда прослойки льда ориентированы параллельно друг другу, или сетчатую (рис. 1.5, в) криогенную структуру.

Массивная криогенная текстура формируется при быстром промораживании и имеет равномерное распределение кристаллов льда.

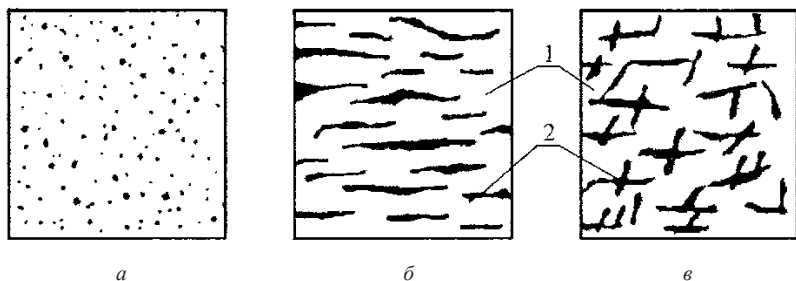


Рис. 1.5. Криогенная текстура мерзлых грунтов: а – массивная; б – слоистая; в – сетчатая; 1 – минеральная часть грунта; 2 – лед

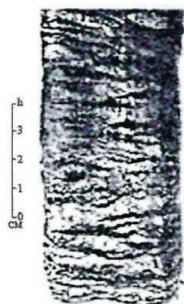


Рис. 1.6. Слоистая текстура.
Суглинок пылеватый
(озерный).
Фото О. П. Овчинникова



Рис. 1.7. Сетчатая текстура.
Глина тяжелая.
Фото С. Тэбера

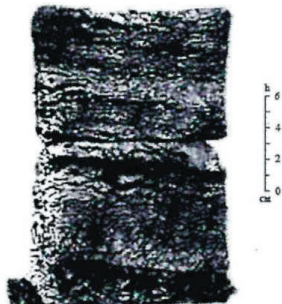


Рис. 1.8. Слоисто-сетчатая текстура.
Суглинок пылеватый.
Фото Е. М. Катасонова

Мерзлые грунты с массивной текстурой обладают более высокой прочностью, а при оттаивании дают наименьшие осадки. Мерзлые грунты слоистой и сетчатой текстуры (рис. 1.6–1.8) обладают меньшим механическим сопротивлением и дают большие осадки при оттаивании, причем при одной и той же льдистости мерзлые грунты сетчатой текстуры наиболее просадочны при оттаивании.

Изучению природы, кинетики и закономерностей структуро- и криотекстурообразования в геокриологии уделялось ранее и уделяется в настоящее время большое внимание. Обусловлено это тем, что криогенное строение мерзлых грунтов оказывает значительное влияние на формирование физических, теплофизических и физико-механических их свойств. Если скопления подземных льдов имеют мощность более 0,3–0,5 м, их необходимо рассматривать как отдельные ледяные тела. Выделяют жильные, инъекционные, миграционные, пещерные и погребенные льды.

Жильные льды заполняют трещины в выветрелых скальных породах. Особенности строения жильных льдов обусловлены их генезисом. Они, в свою очередь, подразделяются на эпигенетические и сингенетические ледяные жилы. Размеры жил по вертикали составляют 3–5 м, по ширине в верхней части – 1,5–2,0 м (рис. 1.9, а).

Сингенетические ледяные жилы формируются одновременно с осадконакоплением. Они достигают огромных размеров: 50–80 м по вертикали и 8–10 м по горизонтали. Форма жил сложная, с расширениями и сужениями (см. рис. 1.9, б, в). В поперечном сечении эпигенетическая ледяная жила имеет форму треугольника (см. рис. 1.9, а).

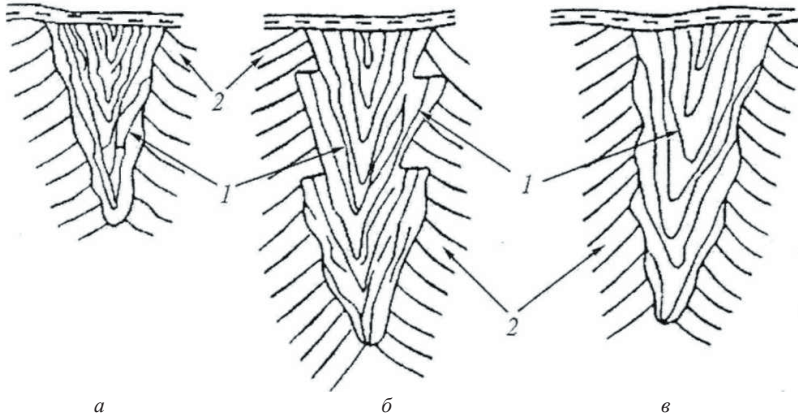


Рис. 1.9. Схема строения эпигенетических (а) и сингенетических (б, в) ледяных жил (по Шумскому): 1 – ледяная жила; 2 – примыкающий массив грунта

Погребенные льды образуются в том случае, когда фирновые льды и снежки покрываются отложениями рыхлых пород или наносами весенних водных потоков.

Подземные льды являются причиной термокарста – образования провалов вследствие протаивания ледяных скоплений. Термокарст, как и подземные льды, существенно влияет на формирование прочности массива мерзлых грунтов.

Рассмотрим кратко основные свойства льда и особенности процесса заморзания–оттаивания, формирующие поведение мерзлых грунтов при механических воздействиях.

Лед – мономинеральная криогидратная порода. Он представляет собой твердые модификации воды независимо от их кристаллического или аморфного состояния. В настоящее время выделяют от 8 до 10 кристаллических и одну аморфную модификацию льда. Аморфная модификация льда образуется при низких температурах в условиях быстрого заморзания. В обычных природных условиях существует лишь одна кристаллическая модификация льда – лед-1. В мерзлых породах присутствует кристаллический лед-1, который может находиться в виде льда-цемента, ледяных включений и подземных скоплений.

Лед в мерзлых грунтах, как правило, содержит различные примеси, которые могут находиться в твердом, жидком и газообразном состояниях и формироваться как одновременно с образованием льда, так и после этого процесса.

Э. Д. Ершов выделил основные структуры и текстуры льда [21]:

- ◆ призматически-зернистая (кристаллы имеют правильную форму и упорядоченную ориентировку);
- ◆ неправильно зернистая (с беспорядочной кристаллографической ориентировкой);
- ◆ промежуточная (характерны признаки и первого, и второго вида структуры).

Текстура льда определяется главным образом особенностями распределения включений. При отсутствии примесей текстуру льда называют *массивной*, или стекловидной, при наличии газовых включений – *пузырчатой*, при слоистом распределении примесей – *слоистой*.

Под действием внешних нагрузок во льду проявляются как упругие, так и пластические деформации, а также хрупкое разрушение. Напряжение, при котором происходит разрушение льда, зависит от величины и скорости приложения нагрузки. При длительном ее воздействии развивается ползучесть. Пластическое деформирование может протекать без изменения объема и видимых разрушений. Это связано с процессами рекристаллизации, проявляющимися в пространственном перемещении границы между кристаллами, в изменении размеров, формы и общего количества кристаллов, а также их ориентации.

По исследованиям С. С. Вялова, лед является идеальным реологическим телом и определяет собой реологические свойства мерзлых грунтов [10].

Газообразные компоненты мерзлых грунтов представляют собой газы и пары воды. Пары воды, хотя и содержатся в незначительном количестве, могут существенно влиять на процессы в мерзлых грунтах при наличии температурных градиентов. В этом случае они перемещаются от мест с большей упругостью к местам с меньшей упругостью и могут быть основной причиной перераспределения влажности в процессе замерзания грунтовой влаги.

Наличие газов оказывает существенное влияние на формирование напряженно-деформированного состояния мерзлых грунтов в процессе их промерзания и оттаивания, поэтому при понижении температуры сокращение объема газов обуславливает образование вакуума в порах, что является одной из существенных причин миграции грунтовой влаги к границе промерзания.

Газовая компонента в мерзлых грунтах может быть не только природного, но и технического генезиса. Газы технического генезиса формируются в процессе инженерной и хозяйственной деятельности человека. Наибольшее их количество содержится на урбанизированных

территориях в грунтах слоя сезонного оттаивания и промерзания, а также в грунтах зоны аэрации сквозных и несквозных таликов и в могильниках свалок. Их концентрация и состав, равно как и влияние на физико-геологические процессы, криогенные процессы и на механические свойства мерзлых грунтов, практически не изучены. Существующий архив публикаций по этой проблеме содержит небольшое количество работ. Таким образом, данная проблема еще ждет своего исследователя [14].

Соли, содержащиеся в мерзлых грунтах, относятся к легко- и среднерастворенной категории. Легкорастворимые – хлориды, сульфаты магния и натрия. К среднерастворимым солям принадлежат гипс и ангидрит. При наличии солей грунтовая влага становится раствором, в результате чего понижается температура замерзания, увеличивается содержание незамерзшей воды.

Все рассмотренные компоненты мерзлых грунтов – твердые минеральные частицы, биогенные включения, вода, соли, лед, пары и газы – находятся в физико-химическом и механическом взаимодействии друг с другом, которое определяется как индивидуальными свойствами каждого компонента, так и влиянием внешних воздействий (температуры, давления и др.).

Таким образом, при решении задач механики мерзлых грунтов их следует рассматривать как сложную многофазную систему.

1.4. Процесс замерзания грунтовой влаги

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

Температура начала замерзания T или конца оттаивания θ_{bf} грунтовой влаги определяет наиболее высокую «пороговую» температуру, при которой грунт переходит из талого состояния в мерзлое, и наоборот (рис. 1.10).

При помещении грунта в среду с отрицательной температурой вначале наблюдается охлаждение (участок I) – понижение температуры грунта без льдовыделения. Обычно участок кривой охлаждения имеет вогнутость к оси температуры. Температура переохлаждения θ_c зависит от теплового баланса в замерзающем грунте. Когда ее величина достигает минимального значения, в поровой воде образуются первые центры

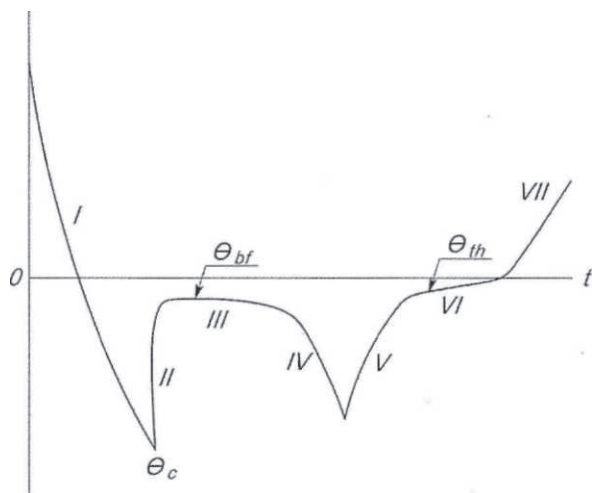


Рис. 1.10. Схема изменения температуры грунта во времени (t) в процессе охлаждения, замерзания и оттаивания [56, 57]: I–VII – характерные зоны (см. объяснения в тексте)

кристаллизации. Затем наблюдается резкое повышение температуры за счет выделения скрытой теплоты льдообразования (участок II).

После температурного скачка наступает период с условно устойчивой постоянной температурой (когда $d\theta / dt > 0$), в течение которого происходит кристаллизация более свободной воды в грунте (участок III). Эта наиболее высокая температура называется *температурой начала замерзания* грунтовой влаги θ_{bf} . Она мало зависит от температуры окружающей среды, может быть принята константой для данного грунта и относится к наиболее важным показателям его физических свойств, так как осреднение отражает внутренние связи между грунтовой влагой и всеми остальными компонентами, являясь исходной «начальной» температурой мерзлого состояния. Дальнейшее понижение температуры грунта происходит по нелинейному закону с выпуклой кривой к временной оси (участок IV). На этом участке происходит замерзание рыхлосвязанной влаги с постепенно уменьшающимся выделением скрытой теплоты льдообразования. И только по окончании этого процесса, когда в грунте остается лишь прочносвязанная вода, наблюдается более быстрое понижение температуры до температуры окружающей среды.

При повышении наружной температуры ход ее изменения в грунте (участок V) практически зеркально отражает участок IV. Нелинейность хода температурной кривой при повышении температуры свидетель-

ствует о поглощении скрытой теплоты еще до начала таяния грунта. Температура же таяния (участок VI) несколько выше температуры замерзания, она также может быть принята стабильной характеристикой данного грунта.

Приведенная схема характеризует сложный процесс замерзания грунтовой влаги весьма приближенно, отражая лишь самые общие закономерности. Вопросы термодинамики и теплофизики процесса фазовых переходов связанной воды являются сложными и недостаточно исследованными. Э. Д. Ершов объясняет эффект понижения температуры замерзания связанной воды искажением ее структурной решетки [21]. Степень такого искажения увеличивается по мере приближения молекул воды к поверхности минеральных частиц. Поэтому при охлаждении затрачивается энергия на восстановление структурного каркаса воды, при котором становится возможным образование первых зародышей льда. Чем больше энергетически связана вода, тем больше при замерзании ее необходимо переохладить до более низкой температуры.

При уменьшении начального влагосодержания дисперсных грунтов уменьшаются толщины пленок связанной воды, увеличивается энергия связи воды с минеральной поверхностью. Температура переохлаждения будет характеризоваться более низкими отрицательными значениями. После появления первых зародышей льда дальнейшее замерзание происходит с выделением теплоты фазовых переходов, что и вызывает скачкообразное повышение температуры грунтовой системы в целом. Наиболее высокое значение температуры начала замерзания грунтовой влаги θ_f характеризует полный термодинамический потенциал.

Скорость процесса замерзания грунтовой влаги определяется также скоростью отвода тепла из замерзающего объема грунта. Опытные данные показывают, что с увеличением дисперсности понижается как температура переохлаждения, так и температура начала замерзания (табл. 1.2).

Уплотнение грунта приводит к уменьшению толщины водных слоев за счет отжатия воды. При этом уменьшается количество свободной воды, что обуславливает понижение температуры начала замерзания.

На начало замерзания влияет также и минеральный состав. Так, силовое поле частиц бентонитовой глины более активно, чем частиц полиминеральной глины. В торфе за счет большого количества свободной воды температура замерзания снижается незначительно.

Наибольшее влияние на снижение температуры замерзания оказывает засоленность грунтов. Растворение в воде солей связывает ее молекулы, понижая температуру замерзания тем сильнее, чем концентрированнее раствор.

Таблица 1.2

Температура переохлаждения и начала замерзания грунтов влаги
в зависимости от вида и свойств грунтов

Грунт	Уплотнение ρ , кг/см	Температура охлаждающей смеси, °С	Весовая влажность, %	Температура, °С	
Песок средне-зернистый	1	-10	20,5	-3	0
Суглинок (содержание частиц < 0,001 мм – 20,8 %)	0,5	-10	32,2	-4	-0,9
То же	10	-10	19,6	-3,3	-0,9
Глина бентонитовая	1	-10	80,5	-4,9	-0,7
Глина полиминеральная	1	-10	34,5	-2,2	-0,25
Торф средне-разложившийся	0	-10	520	-2,5	-0,15

Характерной особенностью мерзлых засоленных грунтов является то обстоятельство, что они содержат соли, относящиеся к электролитам, которые при растворении диссоциируют на положительно и отрицательно заряженные ионы, поэтому количество частиц в растворе электролитов увеличивается по сравнению с раствором неэлектролитов во столько раз, сколько ионов образуется при диссоциации молекул.

Представляют интерес особенности фазовых переходов влаги в торфяных грунтах. Большая водоудерживающая способность торфа, в котором вода занимает более 80 % объема, обусловлена его набуханием при увлажнении. При любой степени разложения в торфе в значительной мере сохраняется клеточное строение. Это обстоятельство, а также незначительная уплотненность частиц торфа, обусловленная их малым весом, являются причиной высокой пористости. Величина коэффициента пористости торфа на порядок выше, чем, например, для глинистых грунтов. Увеличение пористости в торфе по сравнению с минеральными грунтами связано с увеличением не количества пор, а главным образом их размеров. Поры внутриклеточных полостей торфа составляют более 0,01 мм, а размер пор в глинистых грунтах не превышает 0,005 мм. Благодаря большому объему внутриклеточного пространства часть этой влаги не попадает в поле электромолекулярного притяжения и под действием сил тяжести заполняет нижнюю часть поры, оставаясь в свободном состоянии. Такой механизм взаимодействия воды с частицами тор-

фа практически исключает энергетическое влияние поверхности частиц на температуру начала замерзания, и она обусловлена главным образом концентрацией солей, кислот и щелочей в грунтовом растворе [59].

Особенность клеточного строения торфяных частиц, определяющая наличие свободной воды даже при влажности, меньшей полной влагоемкости, и весьма незначительная концентрация солей, кислот и щелочей в поровом растворе приводят к тому, что Q в торфе составляет 0,1–0,2 °С. Так как Q_{bf} песчаных грунтов также близка к 0 °С, то наличие в них растительных остатков не ведет к существенному изменению этой температуры. В глинистых грунтах заторфованность, увеличивая общую влагоемкость, способствует уменьшению влияния электромолекулярных сил взаимодействия между грунтовой влагой, частицами грунта и ионами элементов, растворенных в грунтовой воде, поэтому содержание торфяных частиц в глинистых и любых засоленных грунтах приведет к повышению температуры начала замерзания грунтовой влаги.

1.5. Содержание незамерзшей воды в мерзлых грунтах

Незамерзшая вода в мерзлых грунтах относится к физически связанной, т. е. адсорбированной твердой поверхностью частиц. Она имеет измененные, по сравнению с обычной водой, физические свойства и с понижением температуры постепенно замерзает.

Кратко рассмотрим количественную оценку содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах в зависимости от основных определяющих факторов, что имеет первостепенное практическое значение при оценке механических свойств мерзлых грунтов – прочности и деформации.

Содержание незамерзшей воды в мерзлых грунтах подчиняется принципу динамического равновесия, сформированному Н. А. Цытовичем в 1945 г.: «Количество незамерзшей воды и льда не остается постоянным, а меняется в зависимости от изменения внешних воздействий (температуры, давления и т. д.), стремясь к равновесию при их стабилизации» [56, 57].

Основными факторами, как об этом было сказано выше, влияющими на содержание незамерзшей воды, являются температура и энергетическое взаимодействие воды с частицами грунта и солями. При температуре замерзания в лед переходит только энергетически свободная вода, и лишь при дальнейшем понижении температуры замерзает рыхлосвязанная вода и частично – прочносвязанная.