ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ»

На правах рукописи

Наумов Михаил Александрович

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В КРИОЛИТОЗОНЕ

Специальность 1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
доктор геолого-минералогических наук
Игорь Константинович Фоменко

Москва – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ....4

ГЛАВА 1. ЛИТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В КРИОЛИТОЗОНЕ....9

1.1 История развития представлений о природно-технических и литотехнических системах .. 9

1.2 Определение понятия криолитотехнической системы 12

1.3 Особенности криолитотехнических систем.... 15

1.4 Численное теплофизическое моделирование при оценке состояния криолитотехнических систем 19

1.5 Выводы 23

ГЛАВА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СФЕРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ЧИСЛЕННОМ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ 24

2.1 Понятие сферы взаимодействия и проблемы ее определения 24

2.2 Граничные условия при численном теплофизическом моделировании 28

2.3 Сфера взаимодействия и нижнее граничное условие 35

2.4 Определение сферы взаимодействия на примере пруда накопителя 37

2.5 Выводы 50

ГЛАВА 3. МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ....52

3.1 Теплофизические свойства мерзлых грунтов 52

3.2 Анализ существующих моделей теплопроводности мерзлых грунтов.... 59

3.3 Оценка эффективности моделей теплопроводности.... 66

3.4 Выводы 76

ГЛАВА 4. НЕЗАМЕРЗШАЯ ВОДА В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ....78

4.1 Способы оценки содержания незамерзшей воды.... 80

4.2 Температура начала замерзания грунта 85

4.3 Характеристическая кривая влажности.... 88

4.4 Использование характеристической кривой влажности для оценки содержания незамерзшей воды 94

4.5 Выводы 104

ГЛАВА 5. СТОХАСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ...105

5.1 Источники неопределенности при решении теплофизических задач 106

5.2 Основные положения теории надежности 108

5.3 Метод точечной оценки 111

5.4 Стохастический подход к определению глубины оттаивания магистрального нефтепровода 114

5.5 Выводы 150

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 152

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....155

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Теплофизическое моделирование и прогноз температурного состояния грунтов являются основополагающим этапом при проектировании сооружений в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. В настоящее время данные расчеты достаточно хорошо разработаны и выполняются с использованием различных программных комплексов, основанных на численных методах.

Настоящая работа направлена на рассмотрение трех ключевых вопросов при проведении численного моделирования в рамках решения инженерно-геокриологических задач: оценка сферы взаимодействия, использование моделей теплофизических свойств мерзлых грунтов, применение стохастического подхода.

От точности оценки сферы взаимодействия зависят объемы и методы инженерно-геокриологических изысканий, необходимых для численного моделирования теплофизических задач. Действующие нормативно-технические документы (НТД) предписывают обязательную оценку теплового воздействия проектируемых сооружений на многолетнемерзлые грунты, однако существующие требования к объемам и составу изысканий были разработаны с учетом приближенно-аналитических методов решения теплофизических задач и не отвечают потребностям численного моделирования.

В связи с объективными трудностями лабораторного определения теплофизических свойств мерзлых грунтов действующие НТД допускают их оценку на основе эмпирических зависимостей, которые учитывают физические характеристики грунтов. Однако существующий метод имеет значительные ограничения в применимости, что делает поиск универсальных моделей, наиболее точно описывающих теплофизические свойства мерзлых грунтов, актуальной задачей современных исследований. Отдельно следует отметить актуальность разработки новых подходов к оценке содержания незамерзшей воды, являющегося одним из ключевых факторов, определяющих теплофизические свойства мерзлых грунтов.

Применение стохастического подхода при прогнозировании теплового взаимодействия сооружений с мерзлыми грунтами представляет собой актуальное направление совершенствования инженерно-геокриологических прогнозов. Это обусловлено высокой многофакторностью процессов промерзания и оттаивания, а также их зависимостью от множества параметров различной физической природы, многие из которых носят вероятностный характер. Стохастический подход позволяет учитывать различные факторы неопределенности теплофизической задачи, тем самым повышая надежность результатов численного моделирования, и дает возможность оценить состояние литотехнической системы (ЛТС) с позиций теории надежности.

Объект исследования: ЛТС в криолитозоне.

Предмет исследования: закономерности формирования температурного режима грунтов основания ЛТС в криолитозоне.

Целью диссертационной работы является усовершенствование методики численного теплофизического моделирования состояния ЛТС в криолитозоне.

Задачи исследования:

1. Выявить особенности функционирования ЛТС в криолитозоне.
2. Проанализировать постановку задачи при численном теплофизическом моделировании в инженерной геокриологии для оценки сферы взаимодействия.
3. Выполнить анализ существующих моделей оценки теплофизических свойств дисперсных мерзлых грунтов и рассмотреть их эффективность.
4. Проанализировать методы оценки содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах.
5. Изучить особенности стохастического подхода к решению теплофизических задач в инженерной геокриологии.

Научная новизна исследования:

1. Показан способ оценки теплового влияния от проектируемых сооружений для определения сферы взаимодействия при численном моделировании и, следовательно, обоснования глубины изучения толщи многолетнемерзлых грунтов.
2. Впервые в отечественной практике показана эффективность использования моделей теплопроводности дисперсных грунтов. Продемонстрирована важность учета минерального состава при оценке теплопроводности дисперсных грунтов.
3. Впервые в отечественной практике проанализирована методика использования характеристической кривой влажности для определения содержания незамерзшей воды и температуры замерзания/оттаивания в мерзлых дисперсных незасоленных грунтах.
4. Предложен и апробирован стохастический подход при теплофизическом моделировании с помощью метода точечной оценки.

Практическая значимость работы:

1. Показанный способ определения сферы взаимодействия при выполнении численного теплофизического моделирования имеет важное значения с точки зрения обоснования дополнительных и оптимальных объемов инженерно-геокриологических исследований для целей математического моделирования.
2. Рассмотрены различные модели по оценке теплопроводности мерзлых грунтов и способы оценки содержания незамерзшей воды, ранее не публиковавшиеся в отечественной литературе, что может послужить толчком к их широкому использованию в практике. Показана

перспективность определения минералогического состава дисперсных грунтов для улучшения качества получаемых результатов в моделях по оценке теплопроводности.

3. Предложенный способ стохастического расчета при теплофизическом моделировании является простым в использовании и не требует больших вычислительных затрат, а также значительных компетенций в методологии вероятностных расчетов, что делает его особенно актуальным в практической деятельности.

4. Выводы, сделанные в каждой главе работы, могут быть использованы для решения множества инженерно-геокриологических задач, связанных с оценкой состояния ЛТС в криолитозоне при помощи численного теплофизического моделирования.

Методология и методы исследования включают обобщение отечественного и зарубежного опыта математического моделирования теплофизических задач по взаимодействию сооружений с мерзлыми грунтами и применение современных программных продуктов и методик для решения теплофизических задач. Для расчетов была использована программа TEMP/W GeoStudio (v. 2024 2.1).

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложенный подход по определению сферы взаимодействия при численном теплофизическом моделировании позволяет оценить влияние нижнего граничного условия на тепловое состояние грунтового массива и дает возможность обосновать оптимальную глубину инженерно-геокриологических исследований.

2. Теплопроводность дисперсных грунтов может быть оценена с помощью математических моделей, ключевыми входными параметрами которых являются: минералогический состав, теплопроводность компонентов грунта и комплекс физических свойств. Применение данных моделей обеспечивает более высокую точность по сравнению с традиционным методом, основанным на использовании плотности скелета грунта и влажности.

3. Рассмотренный подход, использующий характеристическую кривую влажности, позволяет определить содержание незамерзшей воды и температуру замерзания (оттаивания) для незасоленных глинистых мерзлых грунтов.

4. Стохастический подход с использованием метода точечной оценки при теплофизическом моделировании позволяет выявить неопределенность прогнозных оценок состояния литотехнической системы и оценить ее с позиции теории надежности.

Достоверность научных положений и выводов обосновывается качеством первичной инженерно-геокриологической информации, применением современных методов математического моделирования, сопоставимостью полученных результатов с принятыми в практике аналитическими решениями и соответствием их физическим представлениям.

Личный вклад автора состоит в поиске, анализе и структурировании зарубежных и отечественных публикаций по рассматриваемым темам, численном теплофизическом моделировании рассмотренных задач, выполнению расчетов в рамках моделей теплопроводности дисперсных мерзлых грунтов, выполнении стохастических расчетов, развитии идей научного руководителя относительно теоретических аспектов работы. В опубликованных совместно с соавторами статьях вклад соавторов равноценен.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на III международном строительном форуме «Арктика» (Москва, 2024); на VI Общероссийской научно-практической конференции молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве» (Москва, 2024); на международной научно-практической конференции «Проектирование, строительство и эксплуатация объектов транспортной инфраструктуры в сложных климатических и инженерно-геологических условиях» (Москва, 2024); на XIX Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Москва, 2024); на XI Международной научной конференции молодых ученых «Молодые-Наукам о Земле» (Москва, 2024); на XVII Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, 2025); на II научно-практической конференции «Геотехника в криолитозоне. Инженерная защита сооружений на ММГ в условиях потепления климата» (Москва, 2025).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 4 работы, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 170 страниц текста, сопровождается 34 таблицами и 73 рисунками. Библиографический список состоит из 221 источника.

Специальность, которой соответствует диссертация. Работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.6.7. «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение».

Диссертационное исследование выполнено в соответствии с паспортом специальности по пунктам:

П.2 Физические, физико-механические и физико-химические свойства грунтов, природа их деформируемости и прочности, корреляция между свойствами, классификационные и расчетные показатели свойств грунтов.

П.5 Термодинамические и теплофизические закономерности формирования толщ мерзлых пород, динамика их геотемпературных полей и мощности при эволюции Земли, изменениях климата и техногенезе.

П.12 Физическое, математическое, аналоговое и другое моделирование геологических, геокриологических и инженерно-геологических процессов, прогноз их развития во времени-пространстве, оценка и управление геологическими опасностями и геологическими рисками.

П.15 Оценка и прогноз изменений инженерно-геологических и геокриологических условий месторождений полезных ископаемых, урбанизированных и сельских территорий, объектов промышленного, гражданского, энергетического и других видов строительства.

Благодарности. Автор выражает свою искреннюю благодарность и признательность научному руководителю – д.г.-м.н. И. К. Фоменко за руководство, ценные советы и саму возможность написания работы.

Автор благодарен коллективу кафедры инженерной геологии МГРИ, оказавшему помощь и поддержку при подготовке настоящей диссертационной работы, в особенности заведующему кафедрой к.г.-м.н. Д.Н. Горобцову, д. г.-м.н. Д.С. Дроздову, к.г.-м.н. Ф.К. Буфееву.

Отдельную благодарность автор выражает к.г.-м.н. И. А. Демкину за наставничество и приобщение к научной деятельности.

Автор благодарит сотрудников «Сектора лабораторных исследований мерзлых грунтов» НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, в особенности к.г.-м.н. Э.С. Гречищеву и Р.В. Махоту за открытость и предоставленные экспериментальные данные.

ГЛАВА 1. ЛИТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В КРИОЛИТОЗОНЕ

1.1 История развития представлений о природно-технических и литотехнических системах

В ходе динамичного развития инженерной геологии в течении XX века, многие исследователи пришли к выводу, что инженерная геология должна рассматривать взаимодействие инженерных сооружений с природной средой как единую сложную систему. Так возникло понятие природно-технической системы (ПТС).

В работах Г.К. Бондарика ПТС рассматривается в контексте общей теории геологического поля, в рамках которой был разработан понятийный аппарат, выделены виды и иерархические уровни ПТС [11; 12; 15].

Под ПТС по Г.К. Бондарику понимается: «упорядоченная в пространственно-временном отношении совокупность взаимодействующих компонентов, включающая орудия, продукты и средства труда, естественные и искусственно геологические измененные тела, а также естественные и искусственные поля» [15]. Согласно классификации Г.К. Бондарика, ПТС подразделяются на три иерархических уровня: элементарные (отдельное сооружение и сфера взаимодействия), локальные (совокупность элементарных систем с пересекающимися или граничащими сферами взаимодействия) и региональные (группа локальных ПТС в пределах некоторого региона).

По целевому назначению инженерных сооружений ПТС классифицируются на: промышленные и гражданские, гидротехнические, транспортные, горные, агротехнические и др. Г.К. Бондариком приведены главнейшие управляющее взаимодействия для каждого типа, а также отражены основные парагенезисы инженерно-геологических процессов, возникающих при взаимодействии технических объектов и геологической среды.

А.Л. Ревзон в своей работе предлагает разделить ПТС на следующие подсистемы [88]:

1. Тропотехническую (взаимодействие с атмосферой).
2. Акватехническую (взаимодействие с гидросферой).
3. Биотехническую (взаимодействие с флорой и фауной).
4. Геотехническую (взаимодействие с геологической средой).
5. Историко-архитектурную.

Таким образом предложенная классификация отражает взаимодействие технических объектов с конкретными компонентами природной среды. Стоит, однако, отметить, что историко-архитектурная подсистема, выбивается из логики данной классификации. Схожий подход к выделению подобной ПТС продемонстрирован Е.М. Пашкиным в работе, посвященной

изучению взаимодействия памятников архитектуры с природной средой [75]. Автором был предложен термин исторические природно-технические системы (ИПТС).

В.Т. Трофимов под ПТС понимает «совокупность инженерного сооружения (комплекса инженерных сооружений) с частью геологической среды в зоне его (их) влияния, имеющей операционально фиксированные границы» [6].

В.Д. Ломтадзе определяет ПТС как «природный комплекс, в пределах которого размещены искусственные объекты, созданные в результате выполнения строительных и других инженерных работ» [59].

В работах Г.К. Бондарика было отмечено, что одной из подсистем ПТС является литотехническая система (ЛТС). «ЛТС представляет собой природно-техническую систему, элементом которой является некоторая область литосферы и функционирование которой определяют процессы взаимодействия искусственных элементов с литосферой» [15].

Графическое отображение видов и иерархических уровней ЛТС, совпадающих с ПТС представлено на Рисунке 1.

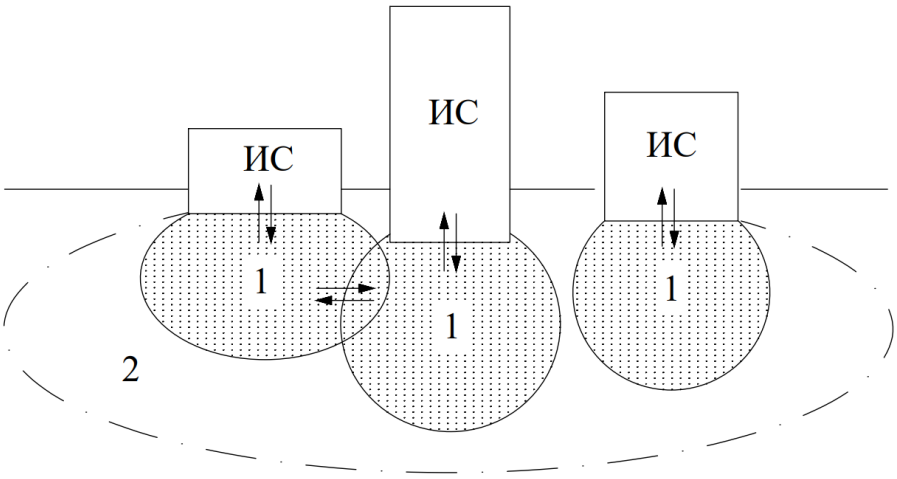


Рисунок 1 – Схематичное отображение строения локальной ЛТС

В дальнейших работах исследователи переосмысливали термин ЛТС. Так согласно В.А. Королеву, под ЛТС следует понимать «часть (или подсистему) ПТС, включающую подсистему инженерных сооружений (объектов техносферы) и взаимодействующую с ней часть литосферы (геологическую подсистему)» [50].

Схожее понятие с ЛТС – геотехническая подсистема, которое предложил А.Л. Ревзон, определяется как совокупность форм взаимодействия инженерных сооружений с геологической средой. Автор предложил классификацию геотехнических подсистем, выделяя их по типу производственной деятельности человека: транспортные, гидротехнические и водохозяйственные, промышленные, сельскохозяйственные, селитебные и рекреационные [88].

Т.И. Аверкина определяет ЛТС как «целостное естественно-искусственное образование, представленное взаимодействующими техническими объектами и геологическими телами или массивами» [1].

В понимании В.Т. Трофимова, «ЛТС – это любая комбинация из технического устройства и литосферного блока любой размерности, элементы которой взаимодействуют друг с другом и объединяются единством выполняемой социально-экономической функции» [103].

Исходя из вышеприведенных определений, ключевое отличие ПТС от ЛТС заключается в масштабе рассматриваемого взаимодействия. В ЛТС система ограничивается взаимодействием сооружения с некоторой областью литосферы (называемой сферой взаимодействия или зоной влияния, о чем будет сказано далее). В то же время ПТС охватывает более широкую область взаимодействия (Рисунок 2), включающую все природные поля (внешние оболочки).

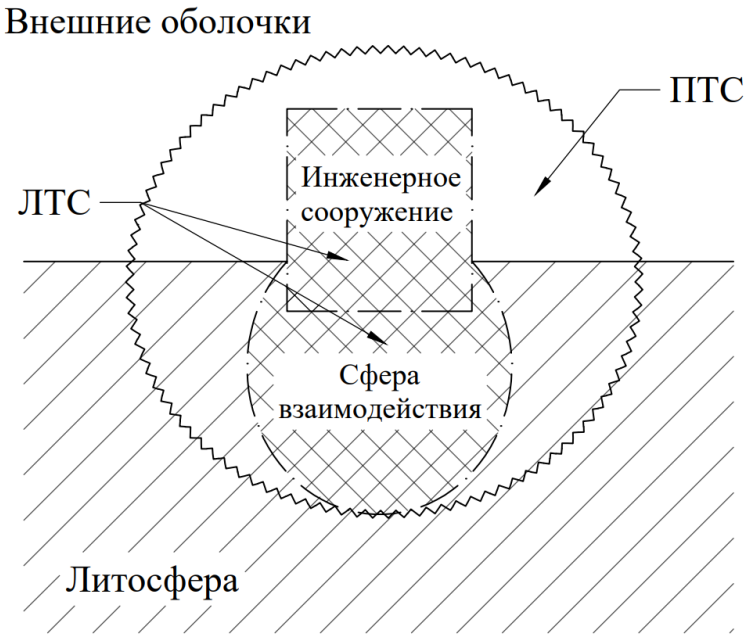


Рисунок 2 – Взаимоотношение ЛТС и ПТС

Несмотря на достаточно долгий период существования понятия ЛТС было предпринято не так много попыток сделать наиболее емкую классификацию. Помимо работ Г.К. Бондарика и А.Л. Ревзона, на сегодняшний день наиболее детальный подход к классификации ЛТС описан в работе Галкина А.Н., где автором были выделены группы, классы, типы, виды и разновидности ЛТС Республики Беларусь [20]. В основу группы был положен признак прямого или опосредованного воздействия технических объектов на геологическую среду, классы выделены по доминирующей роли функционирования ЛТС одной из ее подсистем, типы выделяются по социально-экономическм функциям, виды определяются спецификой элементов ЛТС, обусловленных географическим или социально-экономическими факторами, разновидности выделены по пространственному положению технических объектов к геологической составляющей, и их индивидуальных особенностях [20].

Т.И. Аверкиной была произведена типизация ЛТС по степени экологической опасности, что позволило автору определить категории и выполнить оценку степени экологической опасности локальных ЛТС [1].

Особенности инженерно-геологических условий железных дорог как ЛТС в районе Приамурья были рассмотрены С.В. Квашуком [44].

В.К. Лапердин проанализировал закономерности развития экзогенных геологических процессов в зонах линейных ПТС Восточной Сибири [58].

Чан Мань Льеу определил границы, структуру, свойства, внутренние и внешние взаимодействия ПТС и ЛТС в городской агломерации [14].

В.А. Королев и Н.В. Кузнецова выделяют историческую литотехническую систему (ИЛТС), под которой понимают «целостное естественно-искусственное образование, представленное техническими объектами, являющимися особо ценными в историческом и культурном отношении зданиями, сооружениями и их ансамблями, возраст которых превышает 100 лет взаимодействующими друг другом и с геологическими массивами» [52].

Таким образом, в существующей инженерно-геологической литературе посвященной классификации и теории ЛТС и ПТС, не отображены теоретические особенности ЛТС в криолитозоне. Безусловно, во многих работах и нормативных документах были отражены особенности прогнозирования, мониторинга и управления ЛТС в криолитозоне, особые подходы к инженерно-геологическим изысканиям и др., однако предложений по выделению отдельного понятия не было. Все существующие классификации в той или иной мере опираются на один общий критерий, характеризующий подсистему «сооружение».

По мнению В. А. Королева и В. Т. Трофимова: «будущее инженерной геологии связано с построением теории ПТС и ЛТС: их онтологии, структуры, прогнозирования и т.п. Актуальной задачей инженерной геологии является углубленное изучение опасных геологических и инженерно-геологических процессов в пределах ЛТС с целью их прогноза и обеспечения устойчивого функционирования сооружений» [49].

1.2 Определение понятия криолитотехнической системы

Несмотря на понятное смысловое отличие терминов ПТС и ЛТС, в научной среде возникали споры по вопросу, связанному с определением объекта изучения инженерной геологии. Отдельно стоит заметить, что во многих работах часто два этих термина находятся вместе, тем самым подразумевается их тождественность или близость.

В.В. Пендин указывает, что термин ПТС применительно для целей изучения инженерной геологии, является слишком расширительным и предлагает использовать термин ЛТС для большей конкретизации [76]. В последующей работе дается более развернутое объяснение. Так

при использовании термина ПТС, подразумевается выход за границы литосферы и подземной гидросферы, то есть рассмотрению подлежат все сферы, взаимодействующие с искусственными объектами, однако необходима более высокая степень конкретизации данного понятия, так как основной задачей инженерно-геологических исследований является получение информации, необходимой для оптимизации взаимодействия между литосферой, орудиями и продуктами труда [13]. При определении объекта изучения понятием «природно-техническая система» возникает некоторое несоответствие с целью исследований. Поэтому такой тип систем более корректно называть литотехническими системами. Также сам Г.К. Бондарик пишет, что ПТС должна изучать геокибернетика, под которой понимается «раздел кибернетики, представляющий собой систему научных знаний об управлении природно-техническими системами различных уровней» [15]. Таким образом на данном этапе развития инженерной геологии мы изучаем лишь определенную подсистему ПТС – ЛТС.

Понятие ПТС достаточно широкое и может включать в себя абсолютно любую систему сооружение-геологическая среда, в независимости от особенности последней. Под геологической средой понимается «верхняя часть литосферы, представляющая собой многокомпонентную динамическую систему (грунты, подземные воды, физические поля – тепловые, гравитационные, электромагнитные и др.), в пределах которой осуществляется инженерно-хозяйственная деятельность» [15]. В связи с этим, для определения различий конкретных ПТС, возможно использовать особенности ее подсистемы – ЛТС. Г.К. Бондарик обозначает возможность выделение отдельного типа ЛТС, «в движении которых главенствующими (определяющими) являются взаимодействия искусственных компонентов с подземными водами» [15]. Такие ЛТС предлагается называть гидролитотехническими (например водозабор) [15].

Исходя из вышесказанного, предлагается ввести понятие криолитотехнической системы (КЛТС). *Криолитотехническая система – целостная совокупность, представленная взаимодействующими подсистемами технических объектов и области литосферы, имеющей в своем составе грунты с отрицательной или нулевой температурой, функционирование которой определяют процессы промерзания и оттаивания под влиянием природных и техногенных факторов.*

В данном определении намеренно не употреблены существующие термины «криолитозона» и «криолитосфера», так как в научном сообществе существуют разные точки зрения на правильность использования этих терминов.

И.Д. Данилов отмечает, что эти понятия часто между собой отождествляются, однако они не являются идентичными, имеют принципиальное различие и требуют четкого разграничения. «Криолитосфера – это твердая мерзлая (или шире – отрицательно-температурная) оболочка,

составляющая часть земной коры. Криолитозона – это территория, в пределах которой осуществляется своеобразный тип литогенеза – криолитогенез. В первом случае речь идет о физическом состоянии приповерхностных слоев земной коры (криолитосфера), во втором – пространственно-временной категории (криолитозона)» [32].

С другой стороны, согласно Российской геологической энциклопедии, криолитозона представляет собой «приповерхностную часть земной коры, в которой породы имеют отрицательную температуру, независимо от наличия и фазового состава в ней воды» [92].

Ю.Б. Баду определяет понятие криолитосферы как криогенную толщу пород земной коры, которая в верхней части затронута льдообразованием, а в нижней сложена охлажденными породами и распространенная по площади криолитозоны [5].

Предложенное определение подразумевает выделение КЛТС не только в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ). Часть литосферы, которая состоит из грунтов, имеющих отрицательную или нулевую температуру, может быть временной по природным причинам (сезонномерзлые грунты) или искусственно образована человеком на определенный срок (например, промораживание тоннелей при проходке). Таким образом, разделение КЛТС возможно на основе генетического критерия образования толщ грунтов с отрицательной или нулевой температурой, который отражает их строение и время существования:

1) В зоне распространения сезонного промерзания/оттаивания.
2) В зоне распространения многолетнемерзлых грунтов.
3) В зоне техногенно созданных мерзлых грунтов.

Данное разделение подразумевает под собой и различный подход к прогнозу и управлению КЛТС, но, конечно, наиболее актуальным будет случай нахождения КЛТС в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов.

Таким образом, выделение понятия КЛТС, в соответствии с предложением Г.К Бондарика, базируется на следующих отличительных особенностях взаимодействия сооружений с литосферой:

1. Определяющим взаимодействием подсистемы «сооружение» с компонентом литосферы – криолитосферой.
2. Определяющим процессом функционирования в сфере взаимодействия – промерзанием и оттаиванием.

Согласно Королеву В.А. и Трофимову В.Т., одними из общих инженерно-геологических теоретических проблем по отношению к ЛТС являются [49]:

- обеспечение устойчивости;
- оценка зоны влияния;

- прогнозирование;
- управление.

В связи с этими задачами, выделение понятия криолитотехнической системы обосновано с точки зрения отдельного рассмотрения особенностей функционирования и разработки методологии изучения, прогнозирования и управления данным типом систем. Важным аспектом к решению вышеназванных проблем является усовершенствование существующих подходов к численному моделированию КЛТС.

1.3 Особенности криолитотехнических систем

Физические, физико-механические и другие свойства мерзлых грунтов определяются их тепловым состоянием, которое зависит, в природных условиях, от параметров теплообмена на поверхности земли между литосферой и атмосферой. В то же время этот теплообмен происходит в определенных геологических и географических условиях, которые влияют на строение мерзлых грунтов и особенности их развития. Многолетнемерзлые толщи органически связаны с этой средой, являются ее составной частью и находятся с ней в тесном взаимодействии.

В. А. Кудрявцев отмечает, что динамику развития мерзлых толщ нельзя рассматривать вне законов геологической и географической истории Земли, но в то же время нельзя рассматривать ее и в отрыве от законов теплофизики [54]. Это основное положение определяет и подход к изучению мерзлых толщ, истории их формирования и развития. Формирование и развитие многолетнемерзлых грунтов определяется следующими основными особенностями геологической и географической обстановки:

1. Общим геологическим строением, процессами диагенеза, эпигенеза, и метаморфизма, а также общей историей геологического развития. Другими важными факторами являются современные процессы денудации и осадконакопления, геоморфологическое строение, неотектонические движения.

2. Процессами, формирующими современный облик рельефа – деятельность поверхностных вод, формирование растительного, снежного и ледового покрова, почвообразование, хозяйственная деятельность человека и др.

3. Влагообменом между литосферой и атмосферой, особенностями гидрогеологического строения (условиями питания, разгрузки, циркуляции, режимом и химическим составом подземных вод).

4. Характером радиационно-теплового баланса на поверхности земли и теплообмена между атмосферой и литосферой с учетом особенностей гидрогеотермических условий и геолого-географической обстановки.

Весь этот комплекс природных условий оказывает то или иное влияние на формирование многолетнемерзлых грунтов и каждому такому комплексу соответствует определенный характер мерзлотных условий. Очевидно, что природная обстановка не остается постоянной, а непрерывно изменяется, что влечет за собой и изменение многолетнемерзлых толщ и их характеристик. Таким образом, динамика и история развития криосферы Земли самым тесным образом связана с характером и историей развития области ее распространения. Такая связь осуществляется через радиационно-тепловой баланс поверхности земли и обусловленные им тепловое состояние и температурный режим грунтов в слое годовых колебаний температур.

Исходя из вышеперечисленного, при изучении взаимодействия инженерных сооружений с геологической средой в криолитозоне, необходимо рассматривать многочисленные климатические, геоботанические, ландшафтные и другие факторы. Обуславливается это тем, что состояние системы сооружение – ММГ будет зависеть от теплового взаимодействия не только сооружения с геологической средой, но и геологической среды с внешними оболочками (атмосферой и биосферой). Данный аспект обуславливает необходимость комплексного междисциплинарного подхода к прогнозированию и управлению КЛТС.

Несмотря на очевидное влияние внешних оболочек Земли на состояние системы «технический объект – геологическая среда» в условиях криолитозоны, при детальном анализе сложная ПТС схематизируется до уровня, который позволяет выполнить количественный и качественный прогноз ее работы. Иными словами, происходит переход к ЛТС (КЛТС), в расчетной модели сохраняются только ключевые компоненты. При прогнозировании функционирования КЛТС особое внимание должно уделяется корректной оценке наиболее значимых факторов, оказывающих существенное влияние на поведение системы.

Для управления состоянием КЛТС характерны особенные управляющие взаимодействия, которые необходимы для осуществления ее оптимального функционирования.

Ершовым Э.Д. были классифицированы управляющие методы воздействия на состояние КЛТС. Данная классификация состоит из трех обширных групп, в которых, в свою очередь, конкретизируются отдельные приемы [36]:

1. Направленное изменение среднегодовой температуры грунта и глубины сезонного и многолетнего оттаивания и промерзания посредством изменения параметров внешнего теплообмена.

2. Регулирование процессов тепло и массообмена в грунте посредством изменения состава и свойств мерзлых грунтов.

3. Изменение теплового состояния грунтов посредством использования дополнительных источников и стоков тепла.

При подробном рассмотрении данной классификации, стоит отметить, что большинство рассмотренных методов в первую очередь относятся так или иначе к мероприятиям, влияющим на температурное поле грунтов. Данный аспект связан с способностью мерзлых грунтов улучшать свои деформационные и прочностные свойства при переходе в мерзлое состояние и наоборот, ввиду образования (разрушения) криогенных структурных связей.

Ключевое свойство мерзлых грунтов – зависимость механических свойств от температуры, предопределило подходы к проектированию сооружений в криолитозоне – с сохранением мерзлого состояния основания (I принцип) или с допущением полного или частичного оттаивания (II принцип) [96]. Таким образом, при использовании грунтов основания по принципу I главной задачей является прогноз температурного поля ММГ, а по принципу II – прогноз глубины оттаивания, от теплового воздействия сооружения.

Температура мерзлых грунтов определяет несущую способность основания и соответственно тип и размеры фундаментов, а глубина оттаивания под сооружением – его осадку и соответственно необходимость конструктивных усилений сооружений, состав и объемы работ по предварительной подготовке оснований [108].

Так, например, при повышении температуры мерзлого грунта от –0,5 до –0,3 °С расчетное давление, которое могут выдерживать мерзлые грунты под острием сваи, уменьшается практически в полтора раза с 1300 кПа до 850 кПа [16], а сжимаемость суглинков с одинаковой криотекстурой, в одном случае с температурой –4,2°С, в другом с температурой –0,5°С, может отличаться в более чем 4 раза (не говоря уже о на порядок выше сжимаемости в талом состоянии) [90].

Для защиты ММГ от теплового воздействия применяются специальные меры, являющиеся неотъемлемой частью проектирования: утепление оснований, использование свайных фундаментов с проветриваемым подпольем, строительство на термоизоляционных слоях, установка систем охлаждения и др.

Особенности протекания экзогенно-геологических и инженерно-геокриологических процессов в криолитозоне связаны с периодичностью процессов промерзания и оттаивания, а также особенностями свойств ММГ, грунтов сезонно-талого (СТС) и сезонно-мерзлого слоя (СМС).

«Показателями интенсивности энергообмена над кровлей мерзлой толщи и в ее верхний горизонтах до глубин 10–20 м является геокриологические процессы и формы их проявления» [38]. В естественных условиях изменения на дневной поверхности протекают постепенно, не вызывая быстрого нарушения теплового равновесия грунтового массива. Однако, антропогенное воздействие существенно интенсифицирует теплообмен в ПТС, что выводит ММГ из состояния динамического равновесия. Следствием этого становится активизация существующих или

формирование новых геокриологических процессов. Степень их проявления определяется тепловой инерцией мерзлых толщ, литологическим составом и криогенным строением грунтов, а также особенностями ландшафтной среды и характером техногенного воздействия.

Криолитозона характеризуется высокой чувствительностью к изменениям теплового поля и значительной динамичностью по сравнению с другими геологическими объектами. За последние 10–15 лет, (вследствие быстрого изменения климата) многими исследователями отмечаются интенсивные преобразования криолитозоны [31; 61; 79]:

– тенденция к опусканию кровли мерзлоты и формированию обширных надмерзлотных таликов;
– увеличение пучинистости грунтов;
– активизация термокарста;
– возрастание темпов термоэрозии и оврагообразования;
– рост количества криогенных оползней;
– интенсификация солифлюкции;
– разрушение льдистых берегов;
– активизация криогенного растрескивания, рост повторно-жильных льдов;
– увеличение площади выгорания бореальных лесов.

Естественные процессы на обширных территориях существенно усиливаются техногенным воздействием, особенно при строительстве протяженных линейных объектов [77]. Это приводит к многократному росту аварийности ЛТС. Техногенное влияние значительно интенсифицирует опасные геокриологические процессы, что наиболее характерно при деградации сильнольдистых мерзлых толщ.

Уничтожение растительного покрова, выполняющего функцию естественного теплоизолятора, приводит к увеличению глубины СТС в 1,5–3 раза, особенно на участках мелкодисперсных пылеватых суглинков и супесей [104]. Снятие растительного покрова, а также устройство искусственных покрытий за счет изменения альбедо поверхности могут привести к повышению среднегодовой температуры и увеличению амплитуды годовых колебаний температуры до 5 градусов [54].

Подводя итог, стоит отметить, что все вышеперечисленные негативные факторы, которые могут играть значительную роль в функционировании КЛТС определяют временный характер ряда строящихся и эксплуатирующихся сооружений в криолитозоне, в частности, железных и автомобильных дорог, вахтовых поселков, аэродромов, трубопроводов. Все проектируемые сооружения в криолитозоне имеют четкий срок эксплуатации, на который дается геокриологический прогноз.

Таким образом, можно определить особенности прогноза, управления и строения КЛТС:

1. Управляющие взаимодействия направлены в первую очередь на управление температурным полем мерзлых грунтов. Прогноз состояния системы связан с решением теплофизической задачи.

2. Высокая отзывчивость (чувствительность) состояния ЛТС на малейшие изменения ее компонентов, вызванные как техногенными, так и природными причинами, что приводит к ее быстрому выходу из термодинамического равновесия. Высокая интенсивность (скорость) опасных инженерно-геокриологических процессов.

3. Сложность системы обуславливает высокий уровень схематизации математических моделей, которые используются для прогнозирования ее поведения, в результате чего значительно возрастает неопределенность используемых моделей и результатов прогноза. В случае нахождения в сфере взаимодействия одновременно мерзлых и талых грунтов многократно повышается сложность описания поведения системы.

4. Прогноз состояния системы всегда выполняется на определенный временной интервал (срок эксплуатации сооружений).

5. Особый подход к проектированию сооружений в районах распространения ММГ (два принципа использования грунтов основания), а также к управлению опасными инженерно-геокриологическими процессами.

6. Междисциплинарный подход к изучению системы.

7. Важность геоэкологического прогноза, ввиду быстрого, масштабного и иногда необратимого изменения экологических систем криолитозоны.

8. Особый подход к проведению инженерно-геокриологических исследований.

1.4 Численное теплофизическое моделирование при оценке состояния криолитотехнических систем

Методы моделирования можно разделить на следующие группы: а) понятийное или логическое моделирование; б) физическое моделирование; в) натурное моделирование (использование природных аналогов); г) математическое (численное) моделирование [48].

Понятийные модели являются первыми в процессе моделирования природных явлений. Понятийные модели выполняют в основном две функции – описания и объяснения. Понятийная модель геокриологического процесса представляет собой сжатую характеристику его основных, типичных черт и включает в себя объяснение механизма этого процесса. Исходным мотивом для построения понятийной модели является наблюдение процессов или форм их проявления.

Методы физического и аналогового моделирования реализуются в виде натурных, полунатурных и лабораторных экспериментов – как на моделях той же, так и иной физической природы. Возможности этих методов ограничены, сложностью грунтов как природных систем, а

закономерности протекающих мерзлотных процессов определяются большим числом факторов. Совпадение экспериментальных и натурных данных свидетельствует прежде всего о корректном учете основных параметров, определяющих характер процесса. Влияние второстепенных факторов обычно учитывается приближенно, например через масштабные эффекты. Результаты таких исследований представляются в виде баз данных, графиков, номограмм и эмпирических зависимостей. К натурным методам относятся, в частности, стационарные опытные площадки и анализ практики строительства.

Аналоговые методы основаны на воспроизведении исходной системы уравнений с помощью устройств иной физической природы, таких как модели на основе электропроводящих материалов (металлическая фольга, токопроводящая бумага – ЭГДА), и электрические цепи с распределенными параметрами (электроинтеграторы) и др. Их применение обусловлено сходством математической структуры уравнений переноса тепла, влаги, электрического заряда и импульса, которые в безразмерной форме оказываются идентичными. В геокриологии аналоговые методы получили широкое распространение в 1950–1970-ых годах, включая решение двумерных и трехмерных задач промерзания и оттаивания (задачи типа Стефана). Использование аналоговых вычислительных машин обеспечивало наглядность результатов, их непрерывное получение в процессе расчета, а также устойчивость и безусловную сходимость решений.

Аналитические методы позволяют получать решения в виде функций, связывающих искомые величины с параметрами задачи, и тем самым выявлять влияние отдельных факторов и их взаимосвязи. Кроме того, такие решения имеют непрерывный характер. Однако, из-за многофакторности геокриологических процессов их применение сопровождается существенными допущениями, которые в некоторых случаях ограничивают практическое применение аналитических методов. Так, например, формула Стефана, связывающая глубину сезонного промерзания (оттаивания) с климатическими условиями и теплофизическими свойствами грунта, не учитывает теплообмен в приземном слое воздуха и на поверхности, влияние растительности и снежного покрова, а также пространственно-временную неоднородность свойств грунтов [48].

В настоящее время при теплофизических расчетах взаимодействия сооружений с многолетнемерзлыми грунтами широко применяются численные методы моделирования. Их распространение обусловлено универсальностью, ростом вычислительных возможностей и развитием специализированных программных комплексов. В то же время аналитические методы сохраняют важное значение в инженерной геокриологии. Это связано с тем, что приближенные аналитические решения не требуют значительных вычислительных ресурсов и высокой квалификации в области численного моделирования, а также широко используются для верификации и контроля результатов, полученных численными методами.

На сегодняшний день отечественными исследователями, среди которых стоит отметить Хрусталева Л.Н., Роман Л.Т., Ершова Э.Д., Кудрявцева В.А., Гарагуля Л.С., Булдовича С.Н., Мотенко Р.Г., Чеверева В.Г., Пустовойта Г.П., Дыдышко П.И., Вялова С.С., Порхаева Г. В. и др. были предложены различные приближенные аналитические решения теплофизических задач:

- Расчет вентилируемого подполья.
- Оттаивание под трубопроводами.
- Величина промерзания и оттаивания.
- Оттаивание под промышленными и гражданскими зданиями.
- Оттаивание вертикальных горных выработок.
- Оттаивание откосов, земляных плотин и дамб.
- Расчеты сезонно-охлаждающих устройств и др.

Среди зарубежных геокриологов, занимавшихся вопросами прогнозирования состояния мерзлых толщ при их взаимодействии с инженерными сооружениями, прежде всего следует отметить работы таких исследователей, как Дж. Х. Джонстон (Johnston, G.H.), Б. Ладаньи (Ladanyi, B.), Н.Р. Моргенштерн (Morgenstern, N.R.), Э. Пеннер (Penner, E.), Л.Э. Гудрич (Goodrich, L.E.), Л.У. Голд (Gold, L.W.), Дж. Б. Берланд (Burland, J.B.), Р.Л. Харлан (Harlan, R.L.), Дж. Ф. Никсон (Nixon, J.F.), Г. П. Ньюман (Newman, G.P.), О.Б. Андерсланд (Andersland, O.B.) и др.

Одним из наиболее значимых обобщающих трудов зарубежных исследователей, посвященных вопросам прогнозирования взаимодействия инженерных сооружений с мерзлыми грунтами, является фундаментальная работа Б. Ладаньи (Ladanyi, B.) и О. Б. Андерсланда (Andersland, O.B.) — «Frozen Ground Engineering», в которой систематизированы основные теоретические положения и практические подходы в данной области на современном этапе [123]. Также стоит отметить более раннюю работу коллектива авторов – Johnston G. H., Ladanyi B., Morgenstern N. R., Penner E., под названием «Permafrost: Engineering design and construction» [163].

Численные методы, получившие широкое распространение, позволяют решать гораздо более сложные задачи (в том числе и трехмерные). Использование численных методов позволяет повысить теоретический уровень исследований и сократить время и затраты на проведение экспериментов, особенно в ситуациях, когда проведение натурных испытаний затруднительно. Известным преимуществом численного моделирования является возможность учитывать неоднородность свойств грунтов, сложный тепловой режим работы сооружений, а также сочетание различных условий теплообмена на поверхности. Численное моделирование носит итеративный характер и требует проверки каждого этапа построения модели.

Однако стоит помнить, что в общем случае невозможно точно предсказать поведение физической системы, так как все многообразие компонентов не могут быть полностью

воспроизведены даже в самых детализированных математических моделях. Таким образом, целью численного моделирования не должно быть абсолютное предсказание, а, скорее, общее понимание закономерностей физического поведения системы [134]. Это позволяет использовать численные решения как надежную основу для проектирования.

На данный момент разработано множество программных комплексов позволяющих решать инженерно-геокриологические задачи методом конечных элементов (МКЭ) или методом конечных разностей (МКР) [55].

М.А. Минкин и соавторы заложили основы нормативного регулирования, разработав РСН 67-87 для трехмерного прогноза температурного режима ММГ с учетом фазовых переходов.

Институт мерзлотоведения СО РАН создал специализированный пакет программ, адаптированный для мерзлотных условий Республики Саха (Якутия) [106].

В Научно-исследовательском институте транспортного строительства корпорации «Трансстрой» разработан программный комплекс для расчета трехмерных температурных полей в основании железнодорожных сооружений [110].

Томский государственный архитектурно-строительный университет предложил комплекс для моделирования нестационарного трехмерного термомеханического взаимодействия системы «сооружение–основание» [33].

К.Г. Шашкин и соавторы внедрили модуль «Termoground» в программную среду «FEM models», позволяющий анализировать промерзание, морозное пучение и оттаивание на базе установившихся температурных и влажностных полей [116].

Коллективом авторов из республики Беларусь был разработан программный комплекс «FROST 3D» позволяющий выполнять теплотехнические расчеты в трехмерной постановке, а также расчет осадок и несущую способность свай [34].

В 2018 г А.А. Усачевым разработан программный комплекс «Борей 3D, специализирующийся в первую очередь на расчетах сезонно-охлаждающих устройств (СОУ). Расчеты могут быть выполнены в том числе и в трехмерной постановке.

В отечественной практике широко используется программа QFROST, разработанная Песоцким Д.Г. в 2016 г. и позволяющая решать широкий спектр инженерно-геокриологических задач.

Наиболее известным зарубежным программным комплексом теплофизического моделирования является модуль TEMP/W программного комплекса GeoStudio. Вместе с тем в ряде других широко используемых программных комплексов, таких как Plaxis, Rocscience, Midas и др., на сегодняшний день также реализованы возможности решения теплофизических задач с применением метода конечных элементов.

1.5 Выводы

Подводя итог обзору развития представлений об объекте изучения инженерной геологии – ЛТС, можно сделать вывод, что в литературе нет особого термина характеризующего особенности ЛТС в криолитозоне.

Для ЛТС в криолитозоне характерны свои уникальные особенности строения, функционирования, а также подходы к их изучению. В связи с этим под криолитотехнической системой предлагается понимать целостную совокупность, двух взаимодействующих подсистем – технических объектов и области литосферы, имеющей в своем составе грунты с отрицательной или нулевой температурой, функционирование которой определяют процессы промерзания и оттаивания под влиянием природных и техногенных факторов.

В контексте изучения особенностей функционирования данных систем и разработки методологических основ их прогнозирования и управления, актуальным направлением решения указанных проблем представляется совершенствование существующих подходов к численному моделированию.

На сегодняшний день методы численного моделирования теплофизических задач в инженерной геокриологии получили широкое развитие и стали неотъемлемой частью решения практических задач.

ГЛАВА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СФЕРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ЧИСЛЕННОМ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

2.1 Понятие сферы взаимодействия и проблемы ее определения

Королев В.А. и Трофимов В.Т. определяют проблему оценки зоны влияния как одну из главных теоретических проблем современной инженерной геологии. В данном случае авторы под этим термином понимают «часть земной коры, непосредственно примыкающую к сооружению или горной выработке, в объеме которой происходят существенные изменения состояния и свойств грунтов, обусловленные строительством или эксплуатацией объекта» [6].

В механике грунтов ранее использовался термин «активная зона грунта под сооружением». Он применялся для обозначения нижней границы сжимаемой толщи под сооружением [52].

Согласно Терминологическому словарю по инженерной геологии, под областью или зоной влияния понимается «область, на которую распространяется воздействие определенного сооружения или явления (например, водохранилища, водозабора, горной выработки и т.п.)» [99].

Н.В. Коломенский в 1968 году ввел понятие «сфера взаимодействия», под которым он понимал объем изменяемых под влиянием сооружения грунтов [52].

Л.А. Молоков определил термин «область взаимодействия сооружения и массива грунтов» под которым понималась часть массива, в пределах которого в процессе строительства и эксплуатации сооружения происходят существенные изменения состава, состояния и свойств грунтов или развиваются инженерно-геологические процессы [52]. Границами этой области принимаются пределы, за которыми отмеченные выше изменения не имеют практического значения.

Наиболее полно теоретические аспекты посвященные проблеме определения сферы взаимодействия отражены в работах Г.К. Бондарика, под которой понималась «область литосферы, в которой под влиянием орудий или предметов труда изменяется течение природного геологического процесса и развивается процесс искусственного происхождения, инженерно-геологический» [15]. В результате инженерно-хозяйственной деятельности человек создает искусственные геологические тела, в самом частом варианте они представлены сферой взаимодействия. Иерархия сферы взаимодействия определена как «инженерно-геологический элемент, расчетный элемент, зона действия процесса, сфера взаимодействия» [15].

Четкое представление о границах сферы взаимодействия необходимо для решения следующих задач [50; 51]:

1) уточнение общих закономерностей, характера и масштабов изменений геологической среды под воздействием сооружений;

2) выбор методики и определение минимально необходимого объема инженерно-геологических исследований на конкретных объектах;

3) прогнозирование физико-геологических и инженерно-геологических процессов в период строительства и во время эксплуатации сооружений;

4) создание инженерно-геологических моделей массива грунтов и т.д.

В.А. Королев и В.Т. Трофимов, отмечают, что проблема установления границ сферы взаимодействия не имеет однозначного решения. «Проведение любой границы принимает неопределенный или условный характер. Критерии их построения в инженерной геологии до сих пор не обоснованы» [49]. Это обусловлено затухающим характером техногенных воздействий, вследствие чего любые предполагаемые границы размываются по мере удаления от источника воздействия. Неопределенными также являются критерии, по которым можно было бы количественно определить допустимые уровни этих воздействий, оценка которых на данный момент дается на качественном уровне.

С практической точки зрения чрезвычайно важным вопросом, связанным с проблемой определения сферы взаимодействия, является вопрос о границах ЛТС. «Теоретические границы ПТС (ЛТС) определяет поверхность, огибающая все области взаимодействия ее подсистем (компонентов), на которой испытывают разрыв непрерывности процессы взаимодействия подсистем и вдоль которой с одной стороны они остаются непрерывными» [15]. Положение границы определяется расчетным путем или по данным режимных наблюдений. Обычно она носит условный характер (задается фиксированным значением параметра), но может быть и четко выраженной (резкостной). В последнем случае на поверхности раздела наблюдается скачкообразное изменение свойств подсистем, препятствующее развитию процесса. При рассмотрении КЛТС примером резкостной границы может служить граница между талыми и мерзлыми грунтами. Другим примером может служить поверхность раздела водовмещающих и водоупорных грунтов при рассмотрении процесса фильтрации.

Граница ЛТС выбирается так, чтобы ограничить изменение геологической и окружающей среды под воздействием сооружения в некотором оптимальном диапазоне по заранее выбранным критериям оптимальности. Эти границы в общей теории систем называются «гомеостатическими». Они характеризуют допустимый диапазон изменений характеристик ЛТС, внутри которого данная ЛТС еще сохраняет механическую устойчивость или «гомеостазис системы», т.е. не переводит в другую систему [52].

Для оценки сферы взаимодействия и границ ЛТС существует необходимый и достаточный объем инженерно-геологической информации, используемой для оптимизации управления и функционирования ЛТС и ПТС.

Г.К. Бондарик определяет инженерно-геологическую информацию как «набор сведений о структурах, свойствах и процессах движения некоторой области литосферы (потенциальной или актуальной ЛТС), отбираемые и используемые для оценки ее современного состояния и для разработки прогноза ее взаимодействий с другими подсистемами» [15]. Инженерно-геологическая информация составляет систему и имеет следующие свойства:

1. Замкнутость.
2. Полноту сведений о свойствах компонентов ЛТС.
3. Точность и доверительную вероятность.
4. Количество или оптимальность.

«Свойство замкнутости информации определяется отношением пространственно-временных границ ЛТС в пространстве и в физическом времени» [15]. Свойство оценивается с помощью двух показателей: пространственной замкнутости – M_ξ и временной замкнутости – M_t, которые определяются по формулам [15]:

$$M_\xi = \frac{F}{f}, \tag{2.1}$$

$$M_t = \frac{T}{t}, \tag{2.2}$$

где F – объем литосферы, характеризуемый имеющейся информацией; f – объем информации необходимой для решения инженерной задачи; T – период времени, характеризуемый имеющейся информацией; t – прогнозный период времени.

Если информация в пространственном отношении адекватна потенциальной или реальной ПТС, то информация считается замкнутой ($M_\xi=1$). В случае нахождения границ информации внутри границ ЛТС – информация не замкнута ($M_\xi<1$), а в случае, когда границы ЛТС находятся внутри границ информации – излишне замкнутой *(*$M_\xi>1$).

Аналогично оценивается замкнутость информации по времени: замкнута при $M_t=1$, при $M_t<1$ – не замкнута; при $M_t>1$ – излишне замкнута. Как отмечает Г.К. Бондарик, в инженерно-геологической практике наибольшие сложности возникают чаще всего при оценке замкнутости информации по глубине, т.е. при обосновании мощности приповерхностной области литосферы, которая должна быть охарактеризована инженерно-геологической информацией. Стоит отметить эту особенность, так как она имеет большое практическое значение для прогнозирования состояния КЛТС. Более подробно об этом будет рассказано далее.

Полнота информации (В) характеризуется степенью ее разнообразия [15]:

$$B = 1 - \frac{n_и}{n_{опт}}, \tag{2.3}$$

где $n_и$ – набор свойств о ЛТС, содержащийся в информации; $n_{опт}$ – набор свойств, необходимый и достаточный для решения инженерной задачи.

«Степень полноты инженерно-геологической информации всегда относительна и определяется спецификой конкретной инженерной задачи, решаемой при прогнозировании состояния ПТС и ЛТС» [15]. Одна и та же информация может быть оценена как полная (B=0), неполная (B<1) и избыточная (B>1).

Точность и доверительную вероятность информации определяет содержание инженерной задачи, вследствие чего предполагаются методы прогнозирования процессов функционирования ЛТС и нередко выбор модели.

Важнейшим свойством инженерно-геологической информации является ее оптимальность. «Оптимальным объемом инженерно-геологической информации считается минимально необходимый и достаточный для решения инженерной задачи объем информации заданного качества, удовлетворяющий требованиям замкнутости, полноты, равно-представительности, равной точности и доверительной вероятности» [15].

В наиболее широком смысле идеи об оптимальности информации о любом исследуемом объекте при моделировании были высказаны С.Е. Гречищевым [54]. По результатам статистического анализа, автор приходит к выводу, что суммарная ошибка прогнозируемой величины определяется в основном двумя ошибками: ошибкой модели и ошибкой неоднородности, из которых первая убывает, а вторая растет с увеличением числа учитываемых факторов. Вследствие этого график суммарной ошибки должен иметь минимум (Рисунок 3).

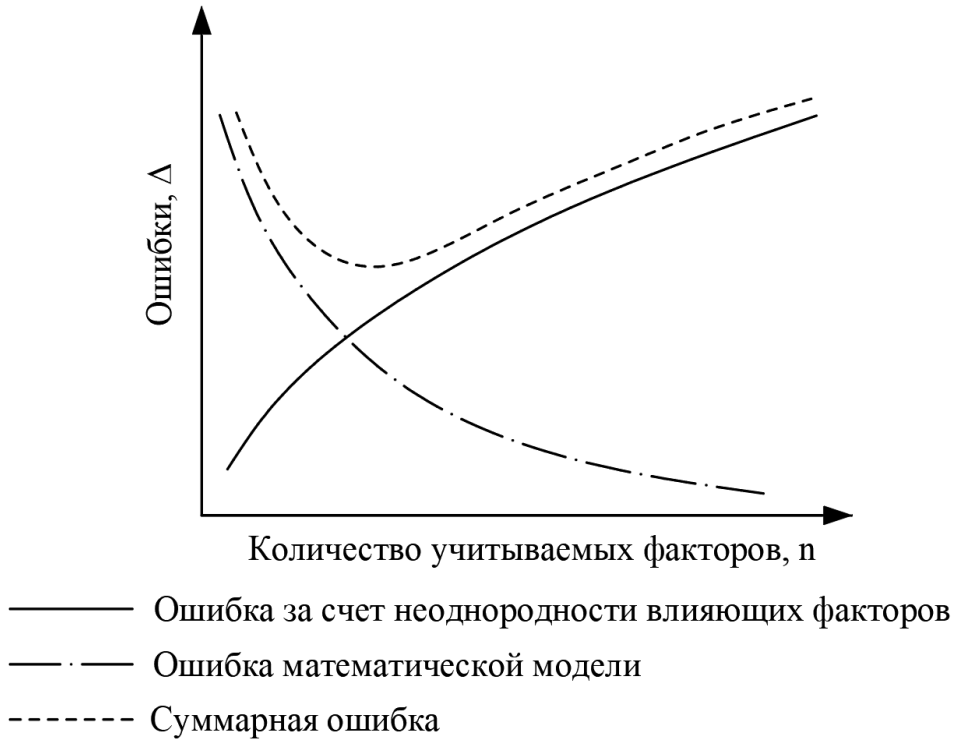


Рисунок 3 – Зависимость комплексов ошибок прогноза от числа учитываемых факторов [54]

2.2 Граничные условия при численном теплофизическом моделировании

При проведении численного моделирования задается геометрия расчетной области, назначаются свойства и начальный температурный режим грунтов, устанавливаются граничные условия (ГУ). Задание ГУ – один из ключевых аспектов численного моделирования. Решения численных задач являются прямым ответом на ГУ. Правильный выбор типа и параметров ГУ позволяет адекватно описывать физические процессы, происходящие в расчетной области, и минимизировать ошибки в прогнозах.

При теплофизическом моделировании применяются три типа ГУ, выбор которых определяется физической постановкой задачи и характером процессов, протекающих на границе [55]:

- Граничное условие первого (I) рода. Определяет зависимость изменения температуры на поверхности от времени.
- Граничное условие второго (II) рода. Определяет зависимость изменения теплового потока на поверхности от времени.
- Граничное условие третьего (III) рода. Определяет зависимость теплообмена между поверхностью и окружающей средой (теплоотдача).

ГУ теплообмена соответственно могут быть приняты на верхней, нижней и боковых границах расчетной области модели.

Выбор временного шага и размера элементов сетки

При численном теплофизическом моделировании как правило решается нестационарная задача, в рамках которой важным аспектом, определяющим как точность расчетов, так и их вычислительную эффективность является выбор временного шага вычислений и размера ячеек конечно-элементной сетки. Расчет оптимального шага по времени – сложная задача, требующая глубоких знаний математического аппарата МКЭ, и, по мнению Л. Сегерлинда [95], ее решение является областью компетенции специалистов-математиков. Поэтому кратко ниже приведены основные особенности данного аспекта моделирования.

Точность вычисленных результатов в некоторой степени зависит от размера временного шага. В течение одного временного интервала процесс считается линейным. Каждый анализ временного шага эквивалентен мини-анализу в установившемся режиме. Пошаговое продвижение во времени является приближением нелинейного процесса. При одной и той же скорости изменения большие временные шаги приводят к большей степени приближения, чем малые. Поэтому при высокой скорости изменения температур (например, при быстрой миграции фронта замерзания или оттаивания) временные шаги должны быть минимальными, тогда как в периоды медленных изменений их можно увеличивать. Особое внимание требуется при моделировании мгновенного приложения температуры с большим градиентом – в этом случае

рекомендуется задавать начальный временной шаг, приблизительно равный отношению удельной объемной теплоемкости к теплопроводности грунта [95]. Назначение как слишком малых, так и слишком больших временных шагов может привести к значительным ошибкам в вычислениях.

Многие тепловые процессы в грунтах следуют экспоненциальной форме: интенсивность изменений максимальна в начальный период из-за высоких температурных градиентов, а затем она постепенно затухает. Поэтому оптимальная последовательность временных шагов также должна приближаться к экспоненциальной – мелкие шаги в начале расчета с постепенным их увеличением по мере стабилизации процесса.

Важнейшим аспектом является взаимосвязь размера элемента сетки и временного шага. Эти параметры находятся в прямой пропорциональной зависимости: удвоение линейного размера элемента позволяет удвоить и временной шаг. Измельчение сетки без соответствующего уменьшения временного шага не приводит к повышению точности результатов.

Геометрия элементов также влияет на допустимый размер временного шага. Треугольные элементы накладывают ограничения на внутренние углы — они не должны превышать 90°, так как тупые углы ухудшают численную устойчивость. Четырехугольные элементы позволяют использовать временной шаг, в два раза больший по сравнению с треугольными при сопоставимом размере.

Таким образом, назначение временного шага и размера сетки при выполнении численного теплофизического моделирования требует баланса между физической адекватностью, численной устойчивостью и вычислительной эффективностью. Детальная оптимизация этих параметров остается задачей, требующей глубоких знаний в области математики метода конечных элементов, однако практический подход, основанный на итерационной корректировке с учетом физики конкретной задачи, позволяет достичь приемлемых результатов в расчетах [74,95].

Условие на верхней границе расчетной области

В многочисленных работах описываются различные методики задания верхнего ГУ, описывающего теплообмен поверхности грунта с атмосферой. На характер этого взаимодействия влияет совокупность множества факторов, которые можно разделить на две группы [22]:

а) климатические факторы (годовая динамика температуры воздуха, динамика осадков в летний и зимний периоды, годовая динамика скорости ветра, радиационный баланс и др.);

б) физико-географические факторы (наклон поверхности, расчлененность рельефа, скорость движения поверхностных вод, растительный покров, величина испарения и др.).

Современные климатические изменения на территориях Арктики представляют собой одну из ключевых проблем для России, что связано с эффектом арктического усиления: скорость роста температур в данном регионе более чем в 2,5 раза опережает глобальный тренд.

Фактическая база, включающая результаты метеорологических, геокриологических и геотермических исследований, подтверждает тенденцию к устойчивому потеплению. Прогностические модели указывают на неизбежное сокращение площади распространения ММГ и дальнейшую деградацию криолитозоны в течение XXI века [102]. По данным коллектива зарубежных авторов, во всем мире температура ММГ с 2007 г. повысилась на 0,29 ± 0,12°С [131].

В условиях меняющегося климата достоверность геокриологического прогноза обеспечивается только при использовании верхнего ГУ, учитывающего полный комплекс основных региональных характеристик климата.

Современные модели климатических изменений дают значительный разброс в результатах, поэтому при подготовке геокриологических прогнозов рекомендуется использовать по крайней мере два сценария потепления – умеренный и агрессивный [74].

При выполнении численного моделирования, независимо от способа задания верхнего ГУ нормативные документы требуют учета фактора потепления климата, выражаемое в повышении среднегодовых температур воздуха, а также изменения мощности снежного покрова [96].

Температурное поле, регистрируемое в момент проведения ИГИ, существенно зависит от вышеперечисленных факторов, которые в свою очередь могут значительно отклоняться от соответствующих статистически усредненных значений. Например, использование в расчетах характеристик снежного покрова, полученных по данным ближайшей метеостанции, может приводить к серьезным ошибкам. Это объясняется определяющей ролью теплоизоляционных свойств снежного и почвенно-растительного покрова в теплообмене грунтов с атмосферой. Снегонакопление в пределах участка зависит от множества факторов (растительность, рельеф, ветровой перенос и др.), однако материалы изысканий обычно не содержат многолетних данных о мощности снежного покрова для конкретной площадки строительства. В связи с этим точное описание условий поверхностного теплообмена оказывается сложной задачей, а упрощенное задание верхнего ГУ приводит к погрешностям моделей и искажению прогноза температурного режима грунтов основания.

Я.Б. Горелик обращает внимание на то, что «произвести адекватную оценку общего влияния теплообмена на поверхности на температурный режим основания невозможно без специальной процедуры оценки вклада отдельных факторов теплообмена, таким образом при решении инженерно-геокриологических задач, в отличие от фундаментальных исследований в геокриологии, параметры верхнего граничного условия подбираются из иных соображений – на основе достижения соответствия ограниченному набору фактических данных» [22]. Таким образом, верификация и корректировка верхнего ГУ являются обязательными процедурами при построении любой математической модели. Игнорирование данного этапа, независимо от

исходного метода задания параметров, делает результаты теплофизического моделирования недостоверными и непригодными для принятия проектных решений.

С.С. Примаков отмечает, что «задача по определению сезонной динамики распределения температурного поля грунтов в естественных условиях в первом приближении может решаться в одномерной постановке, поскольку в отсутствии сооружений латеральные тепловые потоки значительно меньше вертикальных, а латеральная неоднородность грунта, как правило, значительно менее выражена, чем вертикальная» [82].

Фундаментальным термодинамическим условием, характеризующим установившееся (квазистационарное) состояние мерзлой толщи, является температура на глубине нулевых амплитуд сезонных температурных колебаний. Для обеспечения достоверности прогнозных расчетов верхнее ГУ должно предварительно верифицироваться. С этой целью выполняется моделирование температурного режима без учета теплового влияния инженерного сооружения. По мнению Я.Б. Горелика и Д.С. Паздерина, если в течение проектного периода эксплуатации расчетная температура на глубине нулевых годовых колебаний остается постоянной в пределах допустимой численной погрешности, принятое ГУ считается корректным и может быть использовано в дальнейших расчетах, в том числе при моделировании теплового взаимодействия сооружения с основанием [22]. Данная процедура гарантирует отсутствие влияния климатических параметров на результаты, позволяя выделить и количественно оценить собственный тепловой эффект влияния сооружения.

В.А. Кудрявцевым было впервые обосновано, что среднегодовая температура на подошве деятельного слоя (определяемой максимальной глубиной СТС) существенно отличается от аналогичного показателя на поверхности земли [53]. Указанная разница именуется «температурной сдвижкой» [53]. Из этого следует, что в условиях установившихся температурных колебаний среднегодовая температура на глубине нулевых амплитуд эквивалентна температуре на нижней границе СТС, но не поверхности грунта.

Я.Б. Горелик и Д.С. Паздерин также указывают на то, что в качестве дополнительного критерия достоверности принятых в расчетах параметров верхнего ГУ, помимо условия постоянства температуры на глубине нулевых годовых колебаний, можно использовать глубину сезонного промерзания или оттаивания [22].

Таким образом, существует несколько критериев достоверности численной прогнозной инженерно-геокриологической модели:

«1. Соответствие мощности СТС или СМС.

2. Соответствие температуры грунта на глубине нулевых годовых амплитуд.

3. Соответствие распределения температуры грунта по глубине фактическому значению на расчетную дату (дату проведения изысканий)» [81].

В настоящее время разработано множество методик задания верхнего ГУ, некоторые исследователи указывают на необходимость использования комплексных моделей теплообмена [172; 195]. Выбор того или иного метода зависит от цели моделирования, масштабов объекта, требуемой точности, доступности исходных данных и временного интервала прогноза.

Далее будут рассмотрены наиболее широко применяемые в отечественной и зарубежной практике подходы к заданию верхнего ГУ. Следует отметить, что на верхней границе области моделирования могут задаваться несколько различных ГУ для каждого участка с различным режимом теплообмена.

1. Использование натурных данных по замерам термометрических скважин на границе поверхности земли с воздухом. Эти данные могут использоваться в качестве ГУ I рода. По мнению ряда авторов, использование ряда факторов внешнего теплообмена (снежный покров, ветер, солнечная радиация и др.) в некоторых случаях могут быть ошибочными [74].

2. Использование коэффициента теплообмена между грунтом и воздухом. В данном случае ГУ III рода вычисляется исходя из среднемесячных значений скорости ветра и мощности снежного покрова на каждый месяц по формулам [108]:

$$\alpha_{в} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{v}(t)} + \frac{d(t)}{\lambda_{s}}}, \tag{2.4}$$

где d(t) – изменение толщины снежного покрова от времени, м; λ_s – теплопроводность снежного покрова, Вт/(м·°С); $\alpha_v(t)$ – конвективный коэффициент теплообмена поверхности грунта с воздухом, Вт/(м^2·°С), который в зависимости от скорости ветра (u, м/с) определяется по формуле:

$$\alpha_{v} = 6{,}16 + 4{,}19u, \text{ при } 0<u<5, \tag{2.5}$$

$$\alpha_{v} = 7{,}56u^{0.78}, \text{ при } 5<u<30. \tag{2.6}$$

3. Использование n-фактора. В данном методе используется соотношение индексов промерзания/оттаивания для расчета модельной температуры поверхности земли [152]. Каждый индекс рассчитывается как интеграл (или площадь) функции температуры по времени, которая лежит выше или ниже температуры фазового перехода по формуле:

$$n = \frac{\int_0^{tg} (T_{bf} - T_{g})dt}{\int_0^{ta} (T_{bf} - T_{a})dt}, \tag{2.7}$$

где t_g и t_a – продолжительность периодов промерзания/оттаивания поверхности грунта и воздуха соответственно; T_g и T_a – температуры поверхности грунта и воздуха соответственно, T_{bf} – температура фазового перехода.

Температура поверхности земли в данный момент времени может быть рассчитана путем упрощения уравнения следующим образом:

$$T_g = n\left(T_a - T_{bf}\right) + T_{bf}. \quad (2.8)$$

Ориентировочные значения n-фактора приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Ориентировочные значения n-фактора для разного типа поверхности

Тип поверхности	**Холодный период**	**Теплый период**
Еловый лес, кустарники, мхи	0,29 (под снежным покровом)	0,37
Кустарники, мхи	0,25 (под снежным покровом)	0,73
Травяной покров	0,5 (под снежным покровом)	1,0
Гравий	0,6–1,0	1,3–2,0
Асфальт	0,3–1,0	1,4–2,3
Бетон	0,25–0,95	1,3–2,1

Условие на боковых границах расчетной области

На практике чаще применяется условие отсутствия теплового потока через боковые границы Q=0 (условие II рода). Тепловой поток на каждой границе постоянен на все время проведения расчета и по всей плоскости грани [93].

«Условие отсутствия теплового потока через боковую грань математически выполняется в случае симметричности температурного поля. В случае установки нулевого теплового потока через боковую границу и отсутствия симметрии модели, расстояние от контура сооружения в плане до боковой границы области исследования зависит от теплового воздействия инженерных сооружений, а также срока прогнозного расчета» [22].

Согласно РСН 67-87 рекомендуется выбирать расстояние от контура сооружения в плане до боковой границы в 2,5–3 раза больше, чем размеры самого сооружения в том же направлении, но не менее 20 метров [93].

Условие на нижней границе расчетной области

Хотя вопросам задания нижнего ГУ традиционно уделяется меньше внимания, чем верхнего ГУ, этот аспект может оказывать существенное влияние на формирование температурного поля и в ряде случаев становится определяющим фактором достоверности результатов моделирования.

Ряд авторов отмечают, что большой вклад в степень неопределенности численных теплофизических моделей вносят следующие аспекты: адекватное задание ГУ на нижней границе расчетной области, выбор оптимальной глубины расчетной области и достоверное описание характера распределения температур в толще ММГ [22; 66; 101; 123; 155; 181].

Вопрос задания нижнего ГУ особенно актуален в инженерно-геокриологической практике, поскольку при теплофизическом моделировании расчетная область должна быть ограничена по глубине, а на ее нижней границе необходимо задать соответствующее ГУ. Таким образом, положение этой границы определяется глубиной выполненных инженерно-геокриологических изысканий.

Положение нижней границы должно выбираться ниже глубины распространения годовых колебаний температуры в грунтах и в большой степени зависит от интенсивности тепловыделения от сооружения на верхней границе, а также прогнозного срока расчета.

В практике проведения теплофизических расчетов существует два наиболее частых способа учета нижнего ГУ. В первом способе на нижней границе задаются условия теплообмена I рода, т.е. постоянная температура, обычно определяемая на уровне нулевых годовых колебаний [93] или ниже по разрезу с учетом геотермического градиента [83]. Второй способ заключается в задании на нижней границе условия теплообмена II рода, т.е. задание величины теплового потока, обычно принимающегося равным нулю [87].

Главное ограничение двух подходов заключается в том, что при приближении теплового влияния от сооружения к нижней границе модели, расчеты становятся некорректными. Это связано с тем, что «процесс распространения тепла в грунте описывается уравнением параболического типа, согласно которому скорость распространения возмущений в среде бесконечна. Таким образом тепловой эффект от сооружения мгновенно распространяется на любую глубину массива» [100]. Если положение нижней границы расчетной области модели выбрано слишком близко к сооружению, то в течение срока эксплуатации влияние нижнего ГУ может быть настолько сильным, что исключит влияние сооружения у нижней границы [22].

Я.Б. Горелик отмечает, что «единственным способом адекватного задания нижнего граничного условия является итерационный подбор такого положения нижней границы расчетной области, при котором ее влияние на результаты моделирования в течение расчетного срока эксплуатации сооружения становится пренебрежимо малым» [22]. Автором отмечается, что для оценки положения нижней границы расчетной области можно использовать результаты работы Баренблатта [8], где вводится радиус теплового влияния в среде от источника тепла $L(\tau)$, выражение для которого в плоском случае имеет вид:

$$L(\tau) = \sqrt{6\mu\tau}, \tag{2.9}$$

где μ – температуропроводность грунта; τ – проектное время эксплуатации сооружения.

В монографии под редакцией Л.С. Гарагули, на примере аналогового моделирования теплофизической задачи, отмечается, что нижняя граница модельной области должна быть задана на глубине, в 3–4 раза превышающей ширину здания [83].

2.3 Сфера взаимодействия и нижнее граничное условие

Итак, верное построение численной модели требует ответственного подхода к заданию адекватных ГУ, от которых будут зависеть результаты прогноза теплофизической задачи. В следствие данной постановки возникают три группы наиболее частых ошибок при построении расчетной модели:

- Недостаточные размеры расчетной области модели, что приводит к искажению результатов расчета вследствие влияния ГУ.
- Неправильный выбор параметров, входящих в верхнее ГУ (теплообмен с поверхностью).
- Упрощенный способ задания ГУ может вносить существенную ошибку в результаты расчетов.

Главной задачей инженерно-геокриологических исследований является предоставление объективной и достаточной информации об инженерно-геокриологических условиях исследуемого участка строительства. В данном контексте важным является обоснование необходимой глубины исследования приповерхностной области литосферы, т.е. выполнения критерия замкнутости информации по глубине, которая должна быть охарактеризована инженерно-геокриологической информацией (в том числе и информацией о температурном режиме грунтов). Исходя из условий постановки теплофизической задачи, это необходимо для адекватного задания нижнего ГУ.

Как отмечалось ранее, единственным способом достоверного задания нижнего ГУ является итерационный подбор положения нижней границы расчетной области. «В свою очередь увеличение нижней границы расчетной области модели зачастую невозможно в виду отсутствия данных о геологическом строении и температуре грунтов, вследствие чего специалистам приходится увеличивать расчетную область модели по глубине без исходных данных» [65].

Согласно принятым на данный момент требованиям к инженерно-геокриологическим изысканиям (ИГИ), глубину выработок (в том числе и термометрических скважин) следует устанавливать, исходя из предполагаемой глубины теплового и механического взаимодействия проектируемых объектов капитального строительства с грунтами оснований с учетом вида проектируемых зданий и сооружений, принципов использования грунтов в качестве оснований [97]. Общий подход заключается в бурении на глубину ниже предполагаемой глубины оттаивания или теплового взаимодействия (в среднем на 5 м ниже), но не менее 10–15 м, при этом температурные замеры должны быть выполнены как минимум до глубины нулевых температурных колебаний, но не менее 10 м. При этом в НТД при назначении глубины скважин не учитывается степень теплового воздействия сооружений их расчетный срок эксплуатации.

Здесь стоит отметить несогласованность требований к глубине скважин с рекомендациями по теплофизическим расчетам РСН 67–87, согласно которым нижняя граница

при моделировании должна быть ниже границы оттаивания, рассчитанного приближенно-аналитическим способом на 10 м, а расчетная область модели (глубина) для калибровки верхнего граничного условия при естественных условиях теплообмена и без наличия тепловыделяющих сооружений должна быть не ниже 15–20 м.

Я. Б. Горелик и Д. С. Паздерин отмечают, что «установление нижней границы расчетной области по положению нижней точки стационарной чаши протаивания под сооружением (или очень близкое расположение к ней), которое можно определить приближенно-аналитическим способом, не является корректным, поскольку, при значительной разнице между начальной температурой мерзлого грунта и точкой его фазового перехода тепловое влияние нулевой изотермы распространяется еще ниже по разрезу» [22].

Как отмечает Хрусталев Л.Н., Цытович Н.А. и др., в пределах оттаивающих оснований, можно выделить несколько зон: талую, оттаивающую, пластичномерзлую и мерзлую (пластично- или твердомерзлую) [39; 108; 111]. Помимо учета деформаций талого слоя необходимо учитывать деформации пластичномерзлой зоны, которая формируется под зоной оттаивания.

Зависимость деформационных свойств дисперсных грунтов от температуры описана в отечественной литературе [9; 90; 91]. При понижении температуры дисперсных грунтов, уменьшается их сжимаемость, так, например, сжимаемость суглинков с одинаковой криотекстурой, в одном случае с температурой -4,2°С в другом с температурой -0,5°С может отличаться в более чем 4 раза [90].

Таким образом для достоверного прогноза осадок сооружений необходимо определять не только мощность зоны оттаивания, но и температурное поле грунтов, залегающих ниже нее. Это, в свою очередь, требует обоснования достаточной глубины расчетной области модели, а следовательно, и необходимой глубины исследования толщ ММГ при проведении ИГИ.

Отдельного внимания заслуживает вопрос определения необходимой расчетной области модели и, соответственно, глубины ИГИ при учете в расчетах климатических трендов, связанных с повышением температуры воздуха. Температурные колебания, распространяясь в толще грунтов в соответствии с законами теплопроводности Фурье, формируют температурное поле ниже зоны годовых колебаний. Глубина проникновения этих колебаний определяется их амплитудой и периодом: чем больше амплитуда и продолжительнее период, тем на большую глубину распространяются температурные возмущения. Так, суточные колебания затухают в пределах нескольких десятков сантиметров, годовые – достигают глубины 10–20 м, колебания с периодом 30–40 лет проникают на 40–70 м, а с периодом около 300 лет – на 100–150 м и более [54].

Учитывая, что прогноз состояния КЛТС обычно составляет несколько десятков лет, минимальные требования НТД, предписывающие проведение изысканий до глубины нулевых

годовых амплитуд, методологически не обеспечивают достаточной информативности для построения достоверной численной модели. Даже без учета теплового влияния проектируемого сооружения, ограничение глубины исследований зоной годовых колебаний делает невозможным корректное задание нижнего ГУ при моделировании долгосрочных климатических трендов.

Следует учитывать, что границы сферы взаимодействия зависят от выбранного метода расчета. Если при приближенно-аналитическом решении инженерно-геокриологических задач достаточно глубины исследований, регламентированной НТД, то при применении численных методов той же глубины может оказаться недостаточно для построения достоверной математической модели. Таким образом возникают предпосылки принципиального недостатка информации для численного моделировании и, следовательно, неверной оценки сферы взаимодействия, что далее будет продемонстрировано на примере расчета глубины оттаивания проектируемого пруда-накопителя.

2.4 Определение сферы взаимодействия на примере пруда накопителя

Часть результатов приведенных ниже ранее опубликована автором в двух работах [63; 69] и используется в настоящей главе с развитием и уточнением полученных результатов.

Описание объекта

Проектируемый пруд-накопитель расположен в пределах Восточного блока Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения, административно расположен в Республике Саха (Якутия), в Мирненском районе, в 15 км к северо-западу от п. Тас-Юрях, на левом берегу р. Тас-Юрях.

Схема водозаборного сооружения ковшового типа отображена на Рисунке 4 и включает в себя наливной водоем-накопитель, подводящий канал, водосброс, шлюз-регулятор.

В географическом отношении участок расположен в пределах Лено-Вилюйской равнины Средне-Сибирского плоскогорья, в междуречье Лены и Вилюй, в бассейне правого притока р. Вилюй – р. Улахан-Ботуобуя.

Сведения об объекте исследования приведены по результатам проведенных инженерно-геокриологических изысканий, предоставленных научным руководителем – д.г.-м.н. И.К. Фоменко, а также по данным литературных источников [37,46].

Климат

Краткая характеристика климатических условий приведена по материалам ближайшей метеорологической станции (г. Мирный).

Климат района классифицируется как резко континентальный, что проявляется в контрастном соотношении продолжительности и суровости сезонов. Зимний сезон, охватывающий около 7 месяцев, отличается преобладанием антициклонической погоды,

незначительной мощностью снежного покрова и экстремально низкими температурами: среднемесячные значения января от –28 до –40 ℃. Для весны и осени характерна кратковременность и существенные суточные ходы температуры. Летний период непродолжителен, с засушливыми условиями и средними июльскими температурами 12–18 ℃; абсолютный температурный максимум достигает 35 °С.

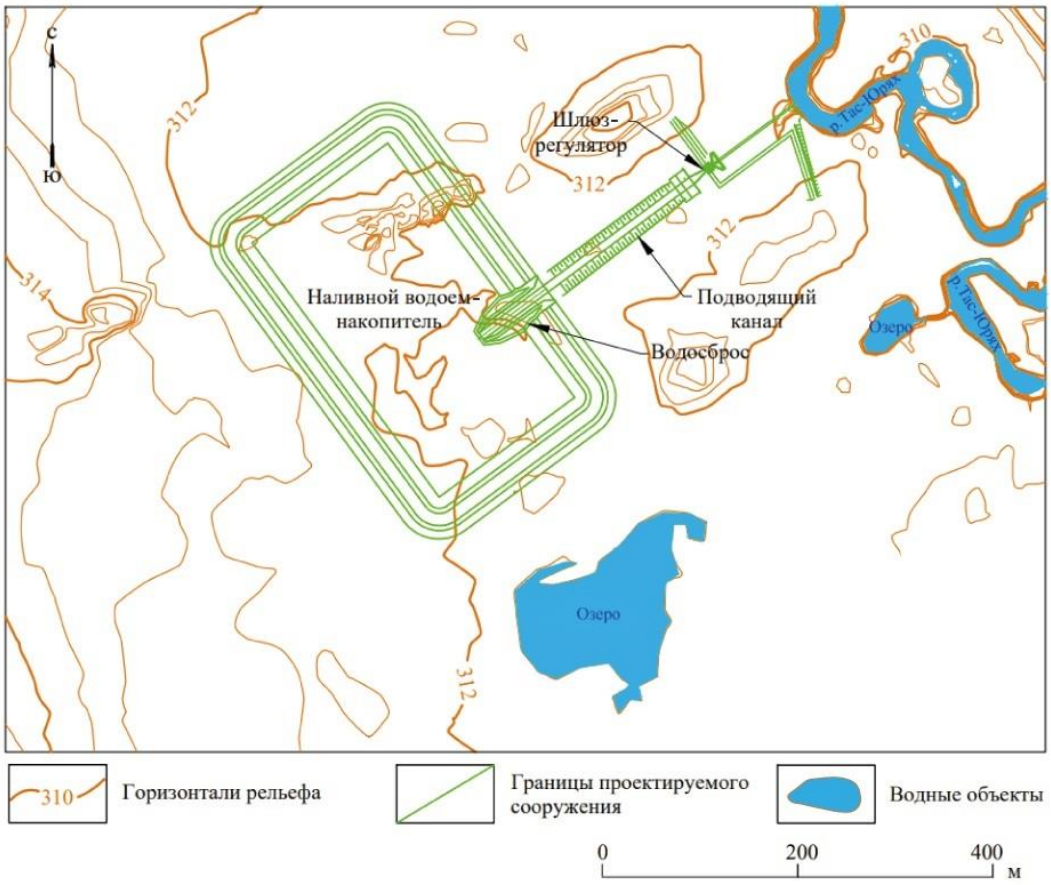


Рисунок 4 – Схема расположения водозаборного сооружения

Средняя годовая температура воздуха составляет –6,3ºС. Абсолютный минимум температуры воздуха достигает –54,7 °С (январь), абсолютный максимум 36,7 °С (август).

В среднем за год выпадает 306 мм осадков. Максимальное месячное количество осадков наблюдается в июне и июле – 49 мм.

Снежный покров формируется в начале октября, а устойчивый покров устанавливается к середине месяца. Продолжительность периода со снежным покровом – 207 дней, а активное таяние происходит в начале мая. На открытых участках максимальная высота снега достигает 64 см. Господствующие направления ветра – западное и юго-западное, летом – северо-восточное; среднемноголетняя скорость – 3,1 м/с.

Гидрография

Гидрографическая сеть исследуемой территории представлена разветвленной системой малых рек и ручьев бассейна р. Улахан-Ботуобия – левого притока р. Вилюй. Площадка изысканий приурочена к левому берегу долины р. Тас-Юрях и граничит с ее руслом.

Для гидрографической сети характерен глубокий врез речных долин. На равнинных участках территории долины рек отличаются большой шириной и обширными заболоченными поймами, в пределах которых повсеместно встречаются старичные озера и мелкие водоемы термокарстового происхождения. Значительная часть территории занята болотами и заболоченными участками.

Питание рек осуществляется преимущественно за счет талых снеговых вод; дождевые осадки вносят меньший вклад. Грунтовое питание практически отсутствует – его доля составляет 5–10 % годового стока, что связано с повсеместным распространением сплошной мерзлоты, препятствующей инфильтрации атмосферных осадков и формированию подземного стока.

Геоморфология и рельеф

Рассматриваемый участок расположен на территории Лено-Вилюйской равнины, входящей в состав Средне-Сибирского плоскогорья. Рельеф представляет собой денудационное наклонное Приленское плато с чередованием невысоких гряд, расчлененных глубокими эрозионными долинами притоков реки Лены. Абсолютные отметки поверхности в пределах участка колеблются в диапазоне 309,0–317,0 м.

Морфологически рельеф характеризуется как волнистое плато, сформированный на линейно-складчатых карбонатно-глинистых отложениях кембрия и юры. Это плато выработалось на основных синклинальных структурах с пологим или горизонтальным залеганием глинисто-карбонатных отложений, неустойчивых к процессам эрозии и денудации. Затрудненный поверхностный сток вследствие слабо выраженного уклона рельефа приводит к значительному переувлажнению грунтов в пределах сезоннодеятельного слоя.

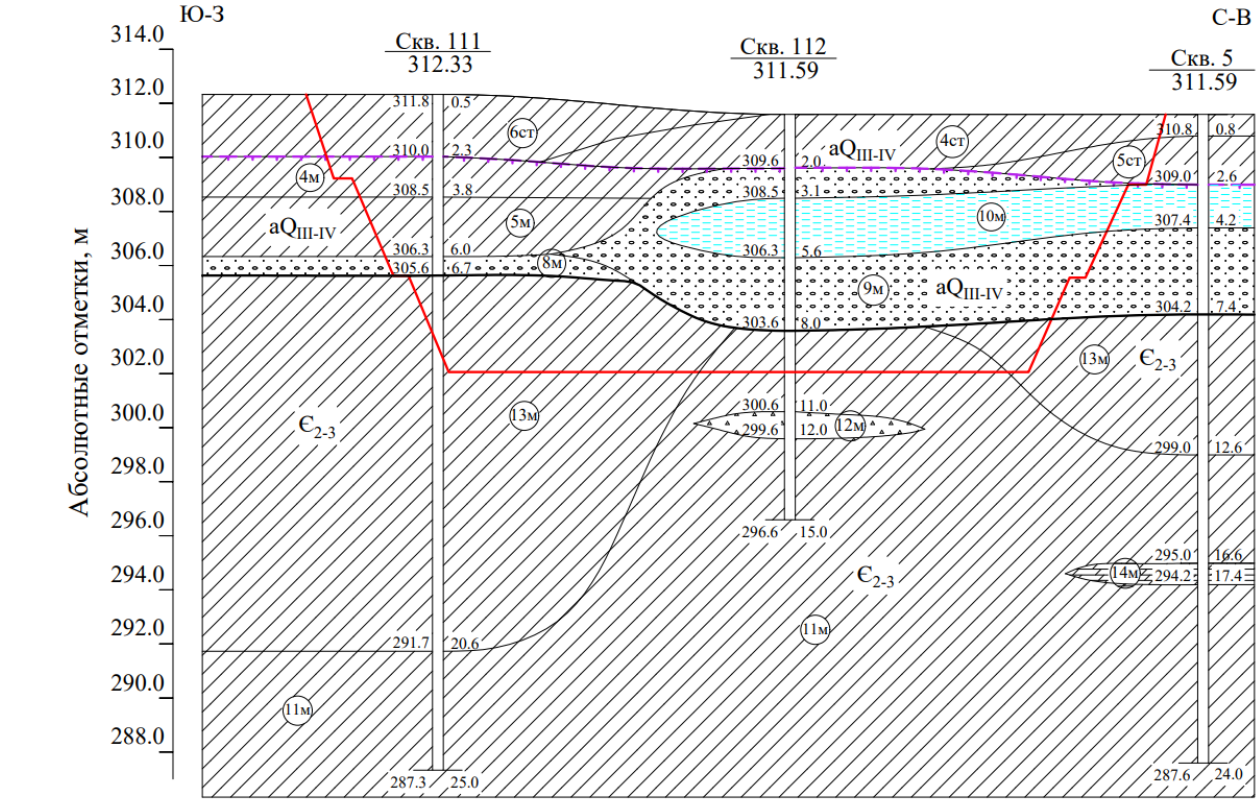
Геологическое строение

В тектоническом отношении изыскиваемый район приурочен к Непско-Ботуобинской антеклизе Ангаро-Вилюйского прогиба Сибирской платформы.

В геологическом строении территории изысканий принимают участие отложения среднего и верхнего отделов кембрийской системы ($Є_{2-3}$) и четвертичные аллювиальные отложения (aQ_{III-IV}).

Разрез участка по данным ИГИ изучен до глубины 25,0 м. Четвертичные аллювиальные отложения (aQ_{III-IV}) представлены суглинками, реже песками и гравийными грунтами. Кембрийская система ($Є_{2-3}$) представлена пестроцветными мергелями, глинистыми грунтами с большим количеством включений дресвы и щебня мергеля. Все отложения, за исключением СТС находятся в мерзлом состоянии.

Всего в пределах площадки изысканий было выделено 12 инженерно-геологических элементов (ИГЭ). Инженерно-геологический разрез участка с описанием выделенных ИГЭ приведен на Рисунке 5.



Условные обозначения

4ст — Суглинок коричневый, слоистой криотестуры, в талом состоянии мягкопластичный, слабольдистый, сезонномерзлый, aQ_{III-IV}

5ст — Суглинок коричневый с прослоями серого, слоистой, реже массивной, криотестуры, в талом состоянии текучий с прослоями текучепластичного, слабольдистый с прослоями льдистого, сезонномерзлый, aQ_{III-IV}

6ст — Суглинок коричневый с прослоями серого, слоистой, реже массивной, криотестуры, в талом состоянии текучий с прослоями текучепластичного, сильнольдистый, сезонномерзлый, aQ_{III-IV}

4м — Суглинок коричневый, слоистой криотестуры, в талом состоянии мягкопластичный, прослоями тугопластичный, с вкл. дресвы и щебня, слабольдистый, мерзлый, aQ_{III-IV}

5м — Суглинок коричневый с прослоями серого, слоистой криотестуры, в талом состоянии текучий с прослоями текучепластичного с вкл. дресвы и щебня, слабольдистый с прослоями льдистого, мерзлый, aQ_{III-IV}

8м — Гравийно-галечный грунт с супесчаным заполнителем пластичной, консистенции, слабольдистый, реже льдистый, мерзлый, aQ_{III-IV}

9м — Гравийно-галечный грунт с супесчаным заполнителем текучей консистенции, с прослоями песка гравелистого, сильнольдистый, мерзлый, aQ_{III-IV}

10м — Ледогрунт, aQ_{III-IV}

11м — Суглинок пестроцветный (от красно-коричневого до голубовато-серого), слоистой криотестуры, в талом состоянии твердый с прослоями полутвердого, с вкл. дресвы и щебня, слабольдистый, мерзлый, $Є_{2-3}$

12м — Дресвяно-щебенистый грунт с суглинистым заполнителем полутвердой и твердой консистенции, слабольдистый, мерзлый, $Є_{2-3}$

13м — Суглинок пестроцветный (от красно-коричневого до голубовато-серого), слоистой криотестуры, в талом состоянии текучий с прослоями мягкопластичного, с вкл. дресвы и щебня, слабольдистый, мерзлый $Є_{2-3}$

14м — Мергель сильнотрещиноватый, местами распадается на щебенистый грунт с супесчаным заполнителем, слабольдистый, мерзлый, $Є_{2-3}$

Границы

стратиграфическая

литологическая

сезонно-талого слоя

проектируемого котлована

Скв. 112 / 311.59 — номер скважины / абс. отметка устья, м

302.3 | 10.0 | 287.3 | 25.0 — Цифрами показаны в м: Справа-глубины слоев и забоя выработки Слева-соответствующие абсолютные отметки

Рисунок 5 – Инженерно-геокриологический разрез с проектным профилем котлована

Геокриологические условия

В геокриологическом отношении исследуемый объект находится в области сплошного распространения ММГ Лено-Вилюйского геокриологического региона, где мощность ММГ может достигать до 300–400 м. Нижняя часть разреза до глубины 500–900 м сложена охлажденными породами, содержащими высокоминерализованные воды [37]. Талики приурочены преимущественно к котловинам крупных озер и руслам рек.

На большей части региона кровля ММГ совпадает с нижней границей СТС (мерзлые толщи сливающегося типа), лишь в некоторых участках кровля ММГ залегает на небольшой глубине под СТС, что связано с развитием несквозных таликов различного генезиса.

По данным ИГИ мерзлые грунты представлены глинистыми, песчаными, крупнообломочными и скальными грунтами. На участке были выделены слабольдистые и сильнольдистые грунты, находящиеся в пластичномерзлом и твердомерзлом состоянии, массивной и слоистой криотекстуры. Также было обнаружено залегание толщи подземного льда (ледогрунта) мощностью до 2,5 м.

По результатам термометрических исследований до глубины 15,0 м установлено, что температура ММГ на глубине нулевых годовых амплитуд в среднем составляет около –1,1ºС. Мощность СТС варьируется в зависимости от разновидностей грунтов в пределах от 2,0 до 2,5 м.

Гидрогеологические условия

Рассматриваемый участок расположен в пределах Лено-Вилюйского артезианского бассейна. Характерной гидрологической особенностью этой территории является существование в палеозойских отложениях трещинно-пластовых и пластовых вод с высокой (до 250 г/л) минерализацией, охлажденных до минус 1,2–2,0°С (криопэги).

Воды кайнозойских отложений практически повсеместно проморожены. В четвертичных отложениях подземные воды встречаются в сезонно-талом слое и в таликах. Они обладают слабым водопритоком и низкой минерализацией.

Исследуемая территория до глубины 25,0 м характеризуется наличием водоносного горизонта, приуроченного к таликовой зоне в гравийных аллювиальных грунтах р. Тас-Юрях (пойма) и вскрыты на глубинах 4,0–5,2 м. Горизонт носит безнапорный характер. По химическому составу грунтовые воды хлоридно-сульфатные магниево-натриевые и кальциево-натриевые, пресные, с минерализацией 0,1–0,2 г/л. Непосредственно на территории проектируемого пруда-накопителя грунтовые воды не встречены.

Методика теплофизических расчетов

Расчет глубины оттаивания грунтов под рассматриваемым прудом выполнен с использованием программного модуля TEMP/W комплекса GeoStudio, основанного на МКЭ в двухмерной постановке.

Дифференциальное уравнение, используемое в TEMP/W, имеет следующий вид [160]:

$$\left(C + L_w \frac{dW_u}{dT}\right)\frac{dT}{dt} = \frac{d}{dx}\left(k_x \frac{dT}{dx}\right) + \frac{d}{dy}\left(k_y \frac{dT}{dy}\right) + Q, \qquad (2.10)$$

где T – температура, k_x – теплопроводность в направлении x, k_y – теплопроводность в направлении y, Q – приложенный граничный тепловой поток, L_w – скрытая теплота таяния / замерзания воды, W_u – влажность за счет незамерзшей воды, t – время.

На Рисунке 6 показана подготовленная математическая модель на основе проектной документации и данных ИГИ. Расчеты производились в соответствие с сроком эксплуатации сооружения – 50 лет.

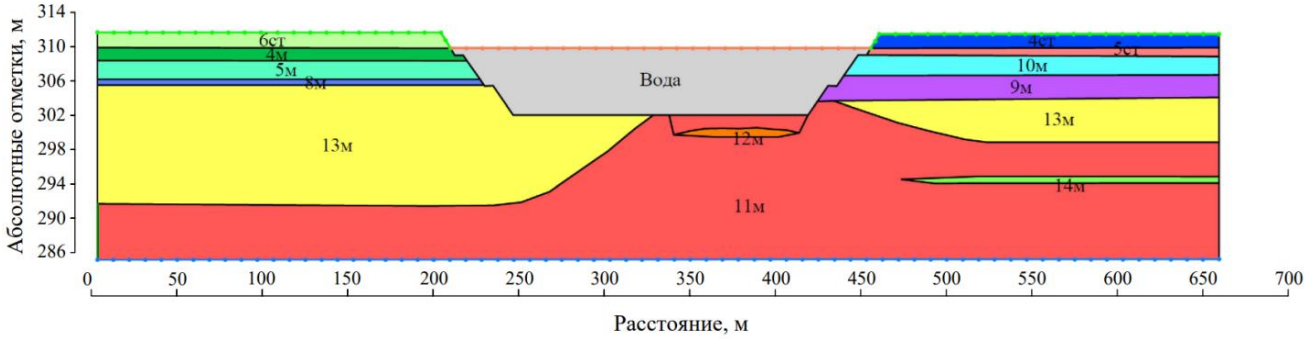


Рисунок 6 – Подготовленная модель для теплофизического расчета

Начальное температурное состояние модели был задано на основании данных замеров в термометрических скважинах, выполненных до глубины 15 м. Распределение температурного поля грунтов показано на Рисунке 7. Глубина нулевых годовых амплитуд по данным ИГИ составляет 10 м, а температура –1,1°С.

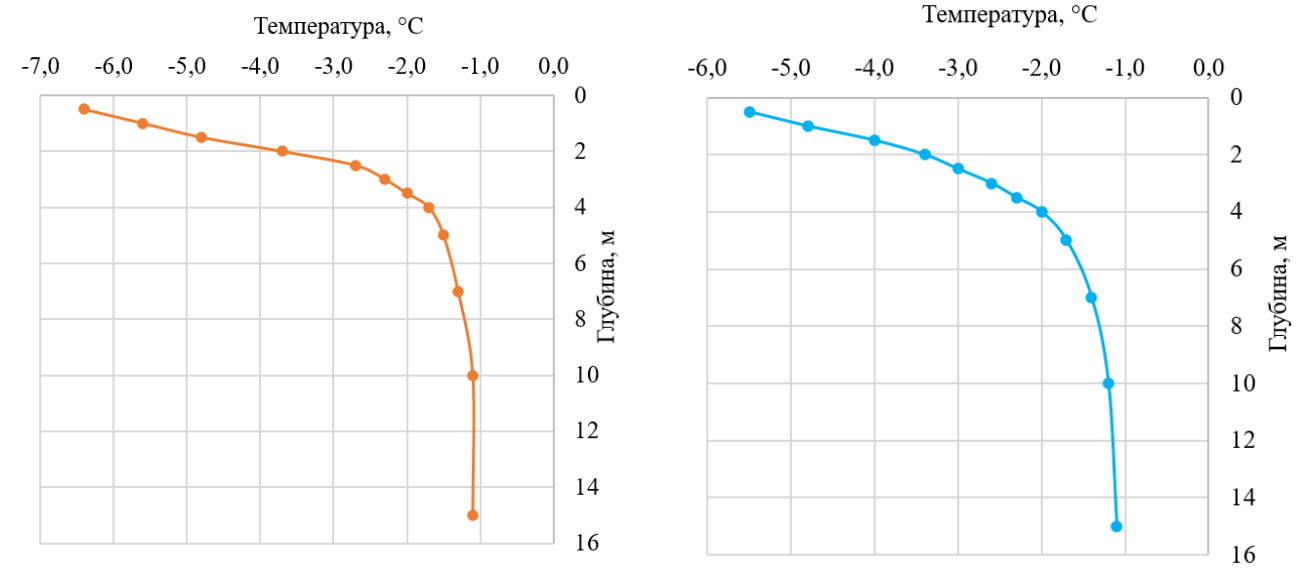


Рисунок 7 – Распределение температур грунтов в скважинах №111 (справа) и № 5 (слева) на начало января

Для каждого ИГЭ в расчетах были использованы теплофизические свойства, определенные в лабораторных условиях (Таблица 2).

Таблица 2 – Теплофизические свойства грунтов используемые при моделировании

№ ИГЭ	Теплопроводность талого грунта $\lambda_т$, Вт/(м·°С)	Теплопроводность мерзлого грунта $\lambda_м$, Вт/(м·°С)	Теплоемкость талого грунта $C_т$, кДж/(м³·°С)	Теплоемкость мерзлого грунта $C_м$, кДж/(м³·°С)	Объемная влажность W_{tot}, д.ед.	Температура замерзания T_{bf}, °С
4ст	1,36	1,64	2600	2020	0,35	–0,2
5ст	1,48	1,73	2780	1860	0,60	–0,2
6ст	1,53	1,96	2780	2020	0,75	–0,2
4м	1,32	1,59	2540	2090	0,30	–0,2
5м	1,49	1,80	2340	1710	0,75	–0,2
8м	2,09	2,67	2270	1930	0,15	–0,15
9м	1,42	1,84	2530	2000	0,25	–0,15
10м	0,56	2,22	4212	2050	1,00	0
11м	1,24	1,49	2430	2120	0,30	–0,3
12м	1,25	1,55	2480	2200	0,30	–0,3
13м	1,38	1,61	2530	2150	0,35	–0,3
14м	1,72	2,11	2000	1800	0,17	–0,3

Для верхнего ГУ на поверхности грунта было задано условие теплообмена III рода с учетом среднемесячных температур воздуха, указанных на Рисунке 8, при помощи методики n-фактора, в которой используется соотношение индексов промерзания/оттаивания для расчета модельной температуры поверхности земли (формулы 2.4–2.5).

В качестве верхнего ГУ на поверхности водоема заданы температуры воды, полученные по результатам инженерно-гидрометеорологических изысканий на опытном участке, с учетом годового хода температур (Рисунок 9).

При калибровке модели были выполнены два условия: сохранение постоянной температуры на глубине нулевых годовых колебаний и соответствие расчетной мощности сезонно-талого слоя (СТС) данным натурных наблюдений (2,0–2,5 м).

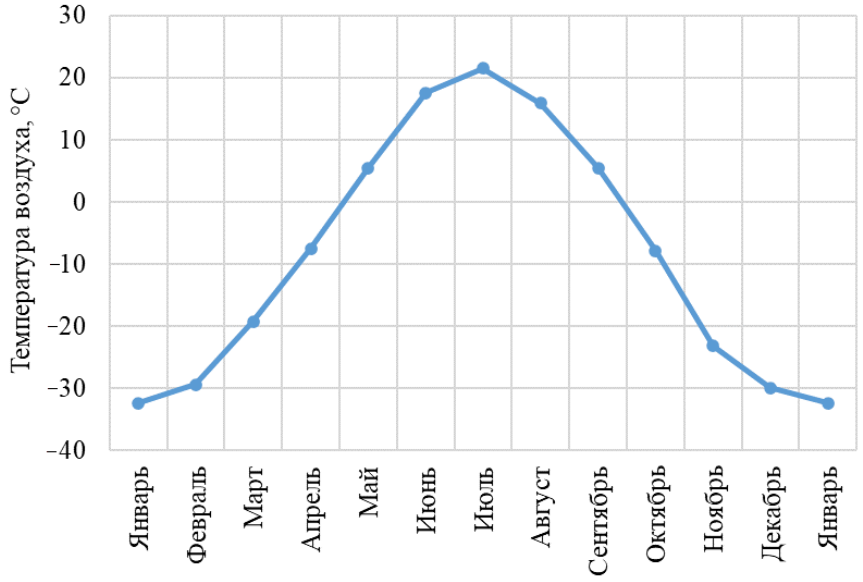


Рисунок 8 – Среднемесячные температуры воздуха

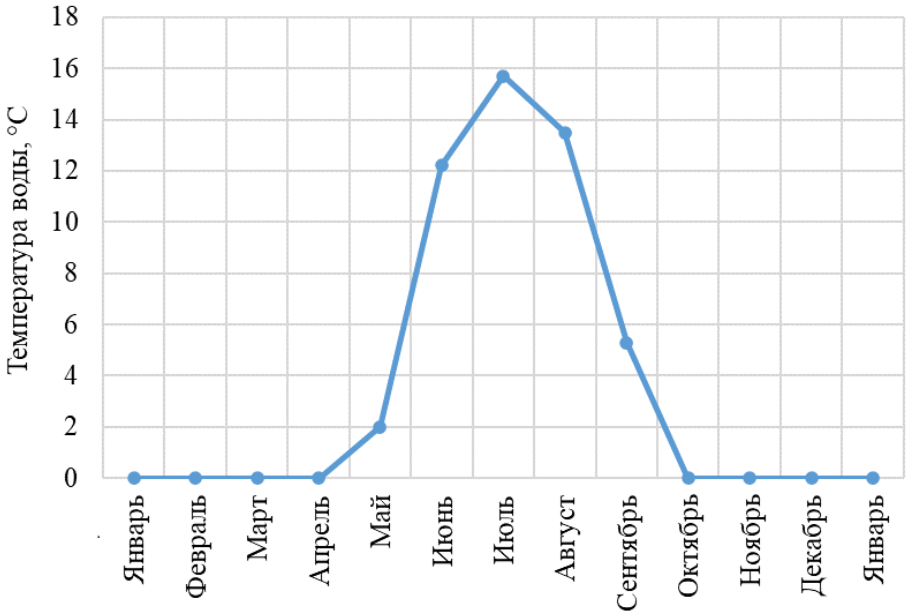


Рисунок 9 – Температура на поверхности воды

Геокриологическое строение рассматриваемого участка в ходе ИГИ исследовалось лишь на глубину до 25 м, а температурные замеры до глубины 15 м. Таким образом, для проверки адекватности численной модели при расчетах была выбрана различная глубина расчетной области: от 25 до 55 м от поверхности.

Температура на нижней границе, в соответствии с существующими подходами, в одном случае принималась равной –1,1°С, в другом на границе был установлен нулевой тепловой поток (Q=0). В следствии того, что температуры на глубинах более 15 м неизвестны, в каждом расчетном случае принято допущение – начальная температура на нижней границе принималась равной –1,1 °С.

Геологическое строение участка ниже глубины выполненных изысканий задавалось на основе архивных данных разведочного бурения. Согласно этим материалам, пестроцветные суглинки кембрийского возраста прослеживаются до глубины 70 м (абс.отм ≈ 240 м).

Результаты расчетов

На Рисунках 10–13 приведены результаты расчетов чаши оттаивания грунтов в основании пруда-накопителя на минимальную и максимальную глубину расчетной области модели, в зависимости от типа нижнего ГУ.

По результатам моделирования максимальная мощность оттаивания при глубине модели 25 м составила: 10,1 м при нулевом тепловом потоке на нижней границе, минимальная – 6,6 м при температуре – 1,1°С на нижней границе.

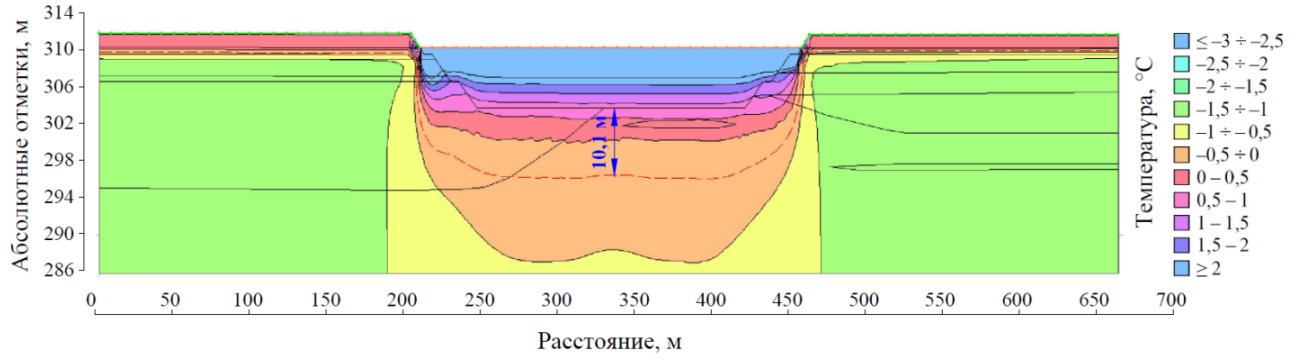


Рисунок 10 – Пример выполненного расчета при глубине модели 25 м с нулевым тепловым потоком на нижней границе

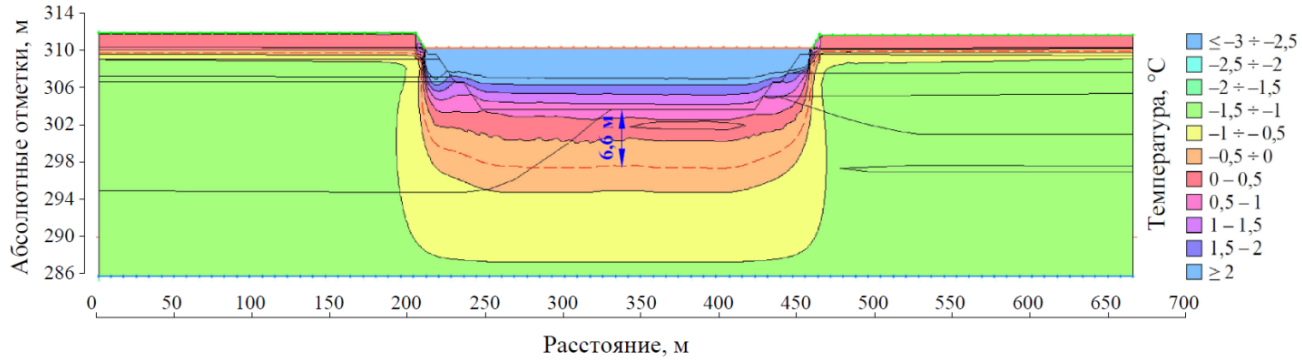


Рисунок 11 – Пример выполненного расчета при глубине модели 25 м с температурой на нижней границе –1,1°С

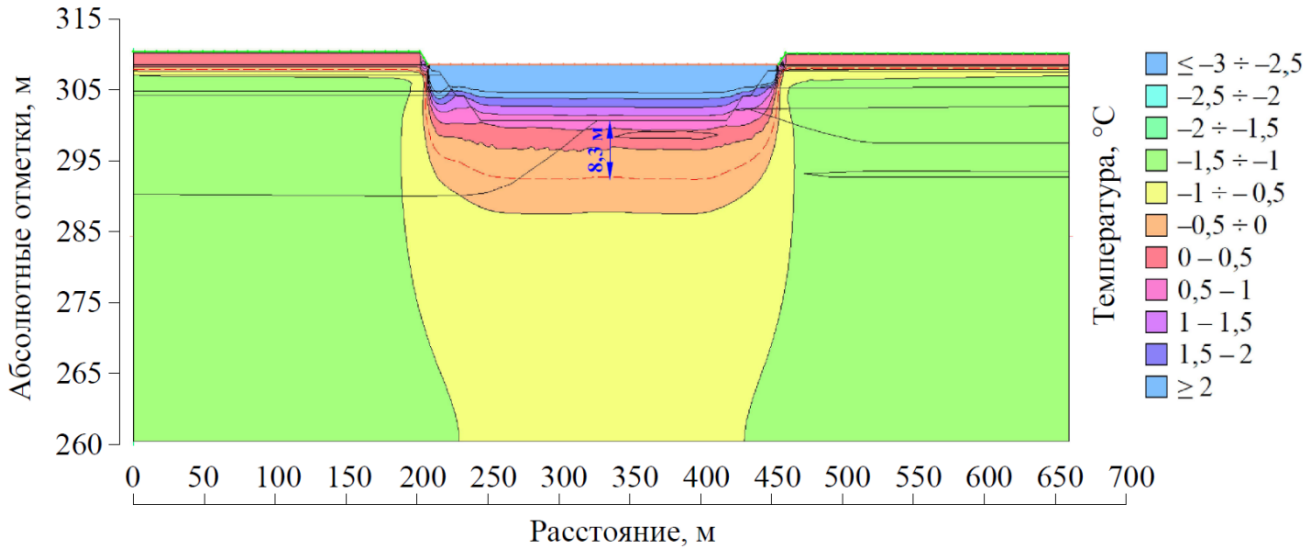


Рисунок 12 – Пример выполненного расчета при глубине модели 50 м с нулевым тепловым потоком на нижней границе

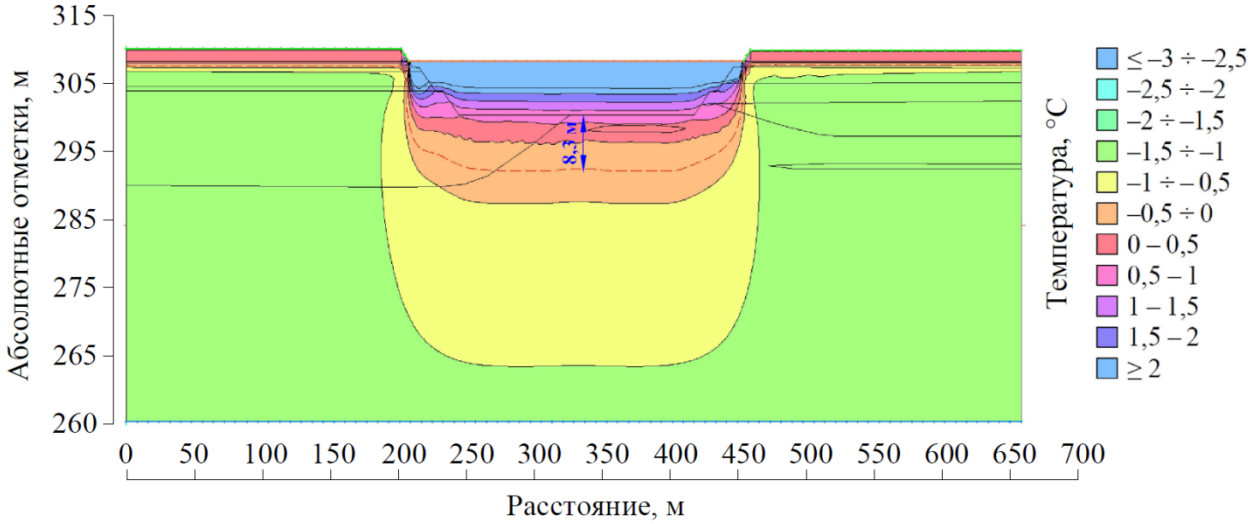


Рисунок 13 – Пример выполненного расчета при глубине модели 50 м с температурой на нижней границе –1,1°С

На Рисунке 14 представлен прогноз на конечный срок службы сооружения в зависимости от размеров модельной расчетной области. Таким образом, получается, что с увеличением расчетной области модели глубина оттаивания стремится к единому значению – 8,3 м, независимо от типа заданного ГУ на нижней границе.

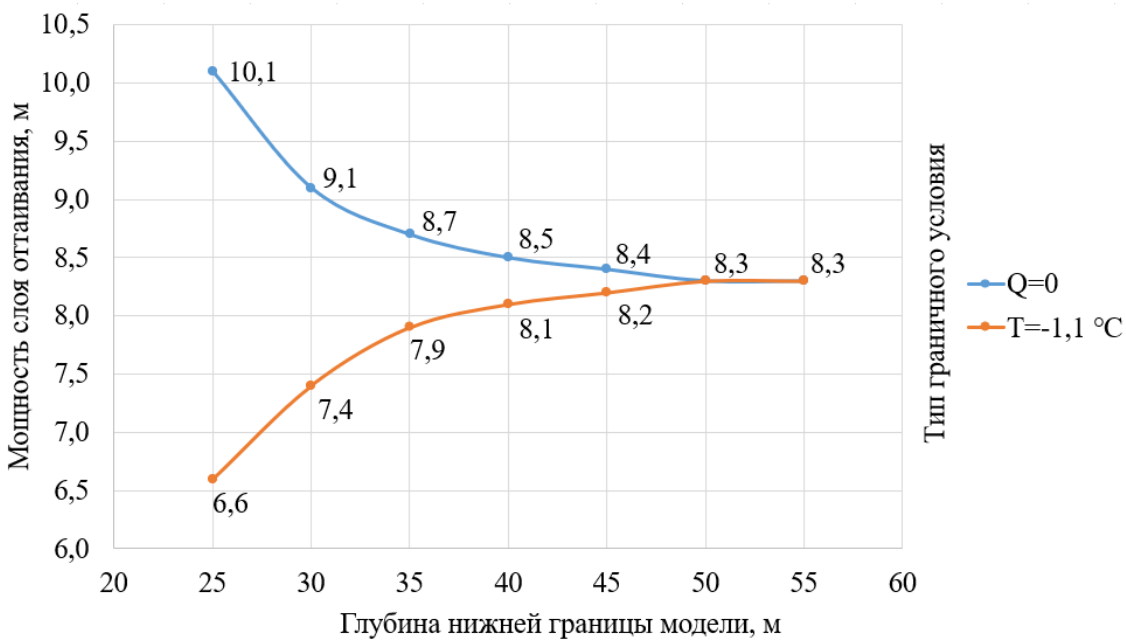


Рисунок 14 – График зависимости мощности слоя оттаивания от глубины и типа ГУ на нижней границе модели на время эксплуатации сооружения – 50 лет

При достаточной глубине модели возможно минимизировать влияние ГУ на результаты определения как величины оттаивания, так и температурного поля грунтов. На Рисунках 15,16 видно, что при глубине модели в 55 м разница температур на нижней границе, при разном типе ГУ, составляет в среднем около 0,1°С. Максимальные различия наблюдаются непосредственно на нижней границе модели.

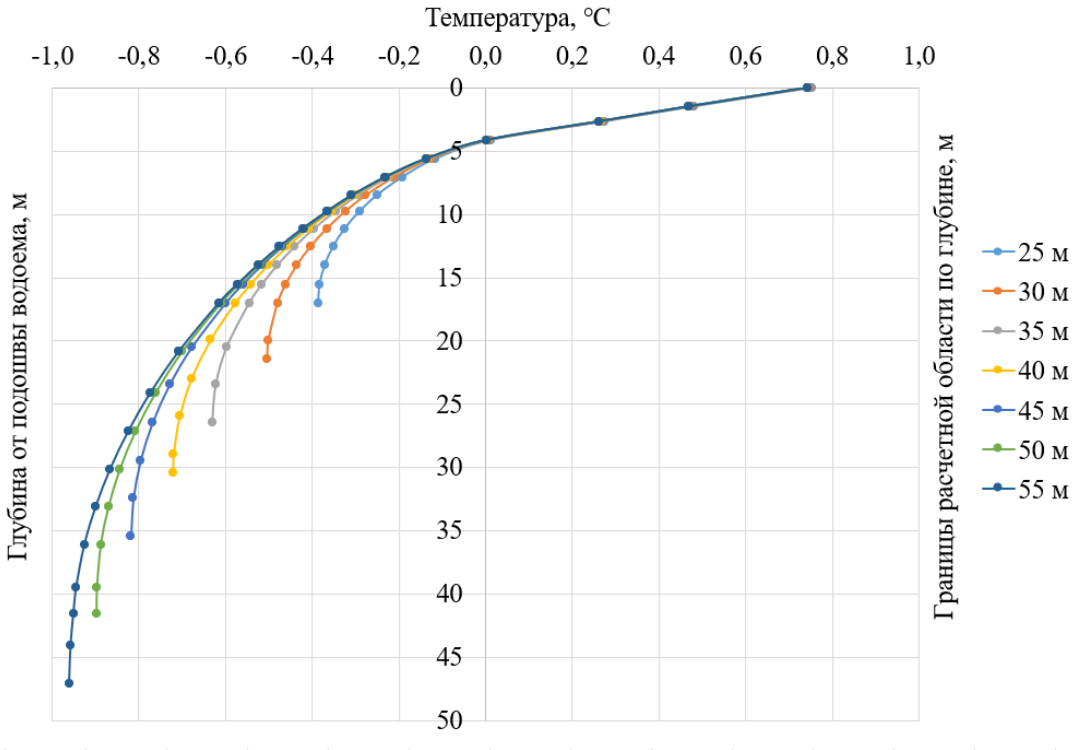


Рисунок 15 – Температурное поле грунтов в зависимости от положения нижней границы на срок эксплуатации при нулевом тепловом потоке (под центром пруда)

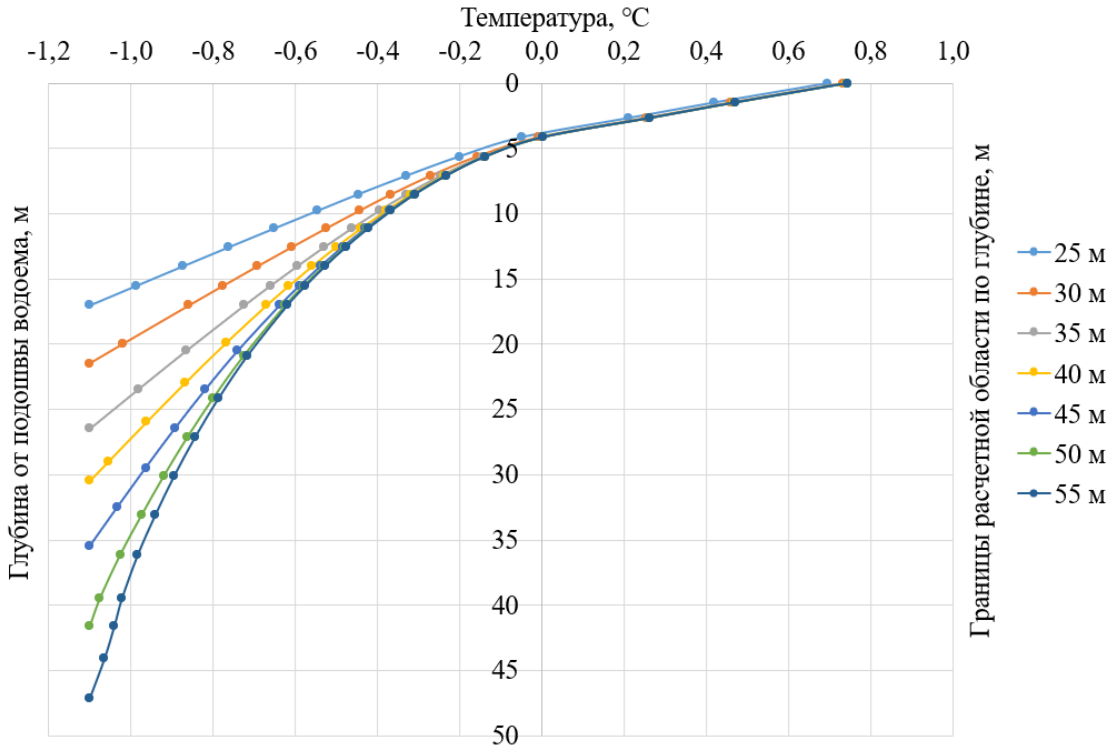


Рисунок 16 – Температурное поле грунтов в зависимости от положения нижней границы на срок эксплуатации при температуре –1,1°С (под центром пруда)

Влияние ошибки, вызванной недостаточной глубиной расчетной области, наглядно проиллюстрировано на графике изменения мощности оттаявшей толщи во времени, на котором видно ее возрастание с увеличением времени прогноза (Рисунок 17).

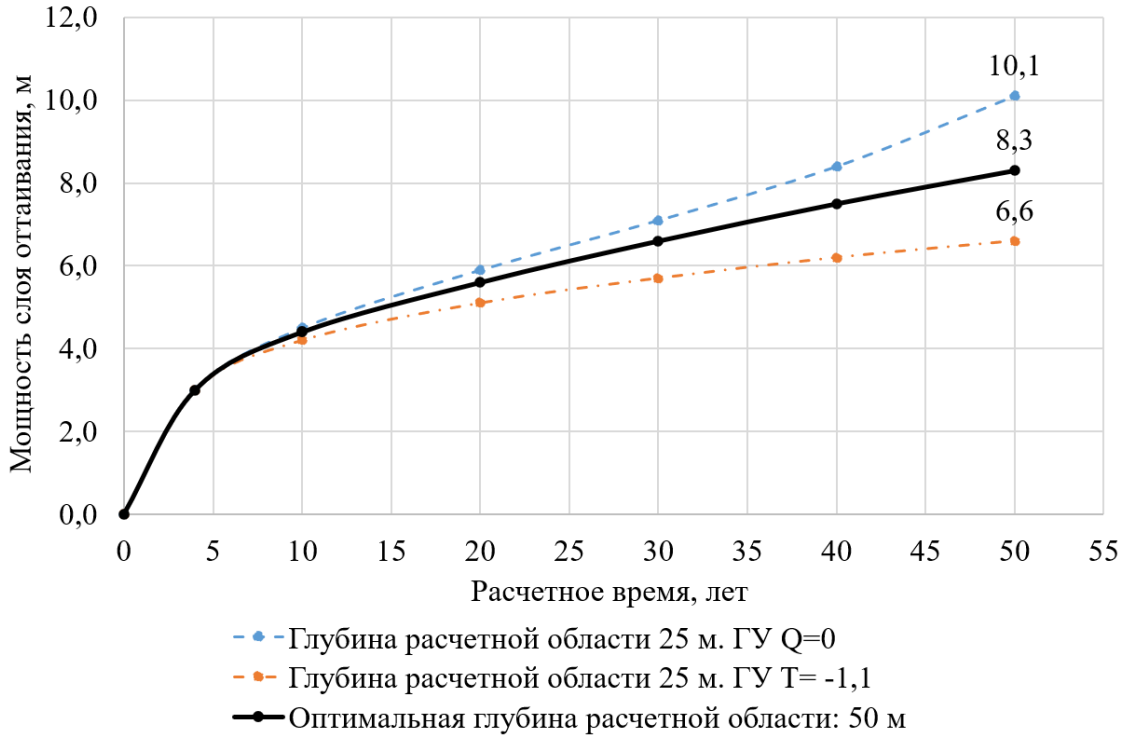


Рисунок 17 – Развитие мощности оттаявшего слоя во времени

По результатам математического моделирования установлены следующие закономерности влияния глубины расчетной области и типа нижнего ГУ на глубину чаши оттаивания в основании пруда-накопителя:

1. При ГУ нулевого теплового потока увеличение глубины расчетной области с 25 до 50 м приводит к уменьшению расчетной глубины оттаивания с 10,1 до 8,3 м; при ГУ постоянной температуры (–1,1 °С) аналогичное увеличение глубины области сопровождается ростом глубины оттаивания с 6,6 до 8,3 м.

2. С увеличением расчетной области модели глубина оттаивания стремится к одному значению – 8,3 м, независимо от типа заданного ГУ на нижней границе, что свидетельствует о достаточности данной глубины модели для исключения влияния нижнего ГУ.

3. При достаточной глубине модели возможно минимизировать ошибку влияния граничного условия на результаты определения как величины оттаивания, так и температурного поля грунтов.

Анализируя полученные результаты, можно обозначить некоторые требования к ИГИ для достоверного решения рассматриваемой задачи:

– идеальным условием для выполнения численных теплофизических расчетов является изучение всей толщи ММГ, однако, с учетом того факта, что их мощность может достигать сотен метров, в современных условиях это практически недостижимо;

– показано существование оптимальной глубины расчетной области, при которой выбор типа нижнего ГУ перестает оказывать существенное влияние на результаты определения мощности талой толщи в основании пруда-накопителя. Данное значение может служить критерием для обоснования минимально необходимой глубины изучения инженерно-геокриологических условий при проведении ИГИ;

– по результатам настоящих расчетов оптимальная глубина модельной области равна 50 м. Стоит отметить, при использовании зависимости предложенной Я.Б. Гореликом (2.9) нижняя граница должна располагаться на глубине 80 м, однако для необходимой точности решаемой задачи данная глубина исследований будет излишней.

С инженерной точки зрения при оценке глубины оттаивания, при достаточной глубине исследований, предпочтительным способом задания нижнего граничного условия будет являться использование нулевого теплового потока (Q=0), так как его результаты будут отражать более консервативный сценарий расчета.

В практике геокриологических расчетов нижнее ГУ задается как некоторая величина геотермического потока тепла [74; 101]. Применение данного ГУ при решении задач по оценке теплового взаимодействия сооружений с ММГ не регламентируется НТД. Неопределенностью данного подхода является величина теплового потока – какие исходные данные необходимо

использовать и как их определить. В результате суммарная неопределенность математической модели может увеличиться.

Любая модель обладает конечностью, упрощенностью и приближенностью по отношению к реальному объекту. Степень упрощения определяется целями исследования, а приближенность является неизбежным следствием ограниченных возможностей описания сложных процессов. Допустимая степень упрощения модели определяется задачами моделирования, а сама модель должна быть адекватна цели исследования и обеспечивать необходимую полноту, точность и достоверность результатов.

Несмотря на принятые допущения при решении рассмотренной задачи (что обусловлено неопределенностью исходной информации, в первую очередь связанной с отсутствием объективных данных о мощности, свойствах и состоянии толщи ММГ), главным является то, что предлагаемый подход основан на принципе уменьшения ошибки математической модели за счет устранения неопределенности исходных данных (достижение полноты, замкнутости, оптимальности и точности инженерно-геологической информации). Таким образом определяется оптимальная глубина исследования инженерно-геокриологических условий для необходимой точности решения конкретной инженерной задачи и построения достоверной математической модели.

2.5 Выводы

Определение сферы взаимодействия является важнейшей задачей в рамках инженерно-геокриологических исследований. Несмотря на то, что данная проблема не имеет однозначного решения необходимо помнить о главных предпосылках при попытках ее определения:

1. Границами сферы взаимодействия принимаются пределы, за которыми не происходят существенные изменения состава, строения, свойств грунтов или инженерно-геокриологические процессы в рамках практического значения.
2. Параметры сферы взаимодействия будут зависеть от метода ее определения.
3. Информация, характеризующая сферу взаимодействия, имеет свойства замкнутости, полноты, точности и оптимальности.

В рамках решения инженерно-геокриологических задач наибольшие затруднения при оценке сферы взаимодействия возникают при обосновании мощности приповерхностной области литосферы, которая должна быть охарактеризована инженерно-геокриологической информацией (т.е. при оценке замкнутости информации по глубине).

Полнота информации полностью определяется характером решаемой с ее помощью задачи, для КЛТС – инженерной задачи. Таким образом для проведения численного

моделирования необходимо иметь оптимальный объем информации о инженерно-геокриологических условиях, который соответствует целям моделирования.

Размеры расчетной области моделирования зависят от множества факторов – периода прогноза, параметров тепловыделяющего сооружения, температуры ММГ и др., поэтому выработка универсальных рекомендаций по требуемым размерам моделей принципиально затруднительна.

При теплофизическом моделировании может возникать ситуация нехватки инженерно-геокриологической информации, что проявляется еще на этапе различий по требуемому размеру модельной области (глубине) между рекомендациями по выполнению численного моделирования и требованиями НТД по назначению глубин инженерно-геологических скважин.

При составлении программы работ на инженерно-геокриологические изыскания необходимо учитывать вероятность возникновения недостатка данных в расчетной области теплофизической модели и предусматривать изучение инженерно-геокриологических условий на достаточную глубину. Эта глубина будет зависеть от конкретных условий площадки и параметров сооружения. В результате чего достоверное выполнение численного моделирования при одностадийных изысканиях затруднительно.

Параметры нижнего граничного условия при численном теплофизическом моделировании отвечают за проверку замкнутости информации по глубине и соответственно отвечает за оценку объема КЛТС и существенно влияют на распределение температурного поля грунтов. Чем выше тепловыделение от сооружений и больше время прогноза, тем больше будет прирастать ошибка за счет некорректного задания нижнего ГУ.

Предложенный подход по определению сферы взаимодействия при численном теплофизическом моделировании позволяет оценить влияние нижнего граничного условия на тепловое состояние грунтового массива и дает возможность обосновать оптимальную глубину инженерно-геокриологических исследований (первое защищаемое положение).

Демонстрация выводов, изложенных в данной главе, будет также проиллюстрирована на примере прогнозирования глубины оттаивания магистрального нефтепровода (Глава 5).

ГЛАВА 3. МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

3.1 Теплофизические свойства мерзлых грунтов

Теплофизические свойства грунтов, являясь ключевыми исходными параметрами для моделирования, играют важную роль в обеспечении точности и достоверности получаемых результатов. Так, например, в работе Г. П. Пустовойта и др. показано, что выбор способа определения теплофизических характеристик песчаных грунтов и их последующий учет в расчетных моделях может вызывать существенные расхождения в прогнозируемой глубине протаивания, которые могут достигать двукратной или трехкратной величины [84].

Особенности протекания процесса теплообмена в грунтах определяют их теплофизические свойства. Распределение температуры в грунтовом массиве и мощность слоя сезонного промерзания-оттаивания являются результирующими характеристиками теплообмена, которые определяют принцип строительства и конструктивные особенности сооружений.

К теплофизическим характеристикам (ТФХ) грунтов относятся:

1) коэффициент теплопроводности в мерзлом и талом состоянии: $\lambda_{f,th}$– Вт/(м·°С);

2) коэффициент температуропроводности в мерзлом и талом состоянии: $a_{f,th}$ – $м^2/с$;

3) объемная теплоемкость в мерзлом и талом состоянии: $C_{f,th}$ – $Дж/(м^3 \cdot °С)$;

4) скрытая теплота замерзания/оттаивания: L_v – $Дж/м^3$.

Три первых характеристики связаны между собой соотношением:

$$\mathbf{a} = \frac{\lambda}{\mathbf{C}}. \tag{3.1}$$

Коэффициент теплопроводности (λ) характеризует способность грунта переносить тепловую энергию и численно равен потоку тепла, проходящего через единицу длины и площади грунта в единицу времени при температурном градиенте равном единице.

Объемная теплоемкость (С) отражает то количество тепла, которое необходимо сообщить единице объема грунта, чтобы изменить его температуру на 1°С.

Температуропроводность (а) характеризует скорость изменения температуры грунта.

Теплота замерзания/оттаивания грунта (L_v) описывает количество теплоты, необходимой для замерзания воды (таяния льда) в единице объема грунта.

Теплоемкость

Различают понятия удельной и объемной теплоемкости грунтов. Удельная теплоемкость грунта численно равна количеству тепла, необходимого для изменения температуры единицы его массы на 1°С [Дж/(кг·°С)]. Объемная теплоемкость численно равна количеству тепла, необходимого для изменения температуры единицы объема грунта на 1°С [$Дж/(м^3 \cdot °С)$]. Значения удельной и объемной теплоемкостей грунта связаны соотношением:

$$C_{об} = C_{уд}\rho, \tag{3.2}$$

где $C_{об}$ – объемная теплоемкость Дж/(м^3°С), $C_{уд}$ – удельная теплоемкость Дж/(кг°С), ρ – плотность грунта, кг/м^3.

Удельная и объемная теплоемкость грунта определяются соотношением твердой, жидкой и газообразной составляющих грунта.

Удельная теплоемкость минерального скелета грунтов изменяется в сравнительно небольших пределах: для большинства минералов она колеблется от 0,67 до 1,05 кДж/(кг·°С). Органические составляющие характеризуются высоким значением удельной теплоемкости. Например, для торфа она составляет 1,51–1,93 кДж/(кг·°С).

Удельная теплоемкость воды и льда, при обычных температурах принимается равной соответственно 4,2 и 2,1 кДж/(кг·°С). Удельная теплоемкость связанной влаги косвенно характеризует подвижность молекул воды, находящихся под действием силовых полей минеральных частиц и растворенных ионов.

Объемную теплоемкость грунта в отечественной практике принято оценивать по следующим формулам [96]:

$$C_{th} = (C_p + C_w W_{tot})\rho_{d,th}, \tag{3.3}$$

$$C_f = [C_p + C_w W_w + C_i (W_{tot} - W_w)]\rho_{d,f}, \tag{3.4}$$

где, C_{th} – объемная теплоемкость талого грунта, Дж/(м^3°С); C_f – объемная теплоемкость мерзлого грунта, Дж/(м^3°С); C_p, C_w, C_i – удельная теплоемкость скелета грунта, воды и льда соответственно, Дж/(кг°С); ρ_d – плотность скелета грунта, кг/м^3; W_{tot} – суммарная влажность, д.е.; W_w – влажность за счет незамерзшей воды, д.е.

Удельная теплоемкость льда определяется в зависимости от отрицательной температуры (Т) по формуле:

$$C_i = 2120 + 7{,}8T. \tag{3.5}$$

Удельная теплоемкость воды определяется по формуле:

$$C_w = C_{wt} - 4550 \cdot C_{ps}, \tag{3.6}$$

где C_{wt} – удельная теплоемкость порового раствора, определяемая в зависимости от отрицательной температуры, Дж/(кг·°С); C_{ps} – концентрация порового раствора, д.е.

В зарубежных источниках принято оценивать объемную теплоемкость мерзлого грунта при помощи значений удельной теплоемкости минерального скелета грунта, а также соотношения льда и воды по следующей формуле [161]:

$$C = \rho_d C_s + C_w W_u \rho_w + C_i W_i \rho_i, \tag{3.7}$$

где С – объемная теплоемкость, ρ_d, ρ_w, ρ_i – плотность сухого грунта, воды и льда соответственно, кг/м^3; C_s, C_w, C_i – удельная теплоемкость твердых частиц грунта и льда

соответственно, Дж/(кг°С); W_u – массовое содержание незамерзшей воды, W_i – массовое содержание льда.

Таким образом, несмотря на несколько отличающуюся запись данных уравнений, по физическому смыслу в отечественной и зарубежной практике величина объемной теплоемкости оценивается одинаково.

Для мерзлого грунта различают его собственную и эффективную теплоемкость. Собственная теплоемкость мерзлого грунта численно равна количеству тепла, необходимого для изменения на 1° температуры единицы объема или массы грунта. При сообщении тепла грунту допускается, что в нем соотношение води и льда не изменяется.

Эффективная теплоемкость мерзлого грунта численно равна количеству тепла, необходимого для изменений температуры единицы объема или массы грунта на 1° и фазового состава поровой влаги в нем. Средней эффективной теплоемкостью (C_{eff}) мерзлого грунта называют среднее значение его эффективной теплоемкости в заданном интервале отрицательных температур, отнесенное к середине этого интервала.

Таким образом, функция теплоемкости мерзлых грунтов состоит из двух частей. Первая часть – объемная теплоемкость грунта (талая или мерзлая), вторая часть – скрытая теплота фазовых переходов в спектре отрицательных температур [55]:

$$C_{eff} = C_{th(f)} + L_0 \frac{\partial W_w}{\partial T}. \quad (3.8)$$

Величина объемной теплоты замерзания (таяния) грунта L_v (Дж/м^3) принимается равной количеству теплоты, необходимой для замерзания воды (таяния льда) в единице объема грунта и определяется по формуле [96]:

$$L_v = L_0 \left(W_{tot} - W_w \right) \rho_{d,th,f}, \quad (3.9)$$

где L_0 – значение удельной теплоты фазовых превращений вода-лед, принимаемое равным $3{,}35 \cdot 10^5$ Дж/кг; W_{tot} – суммарная влажность, д.е.; W_w – влажность за счет незамерзшей воды, д.е.; ρ_d – плотность скелета грунта, кг/м^3.

«В теплофизических задачах в качестве расчетного параметра принимают величину собственной теплоемкости мерзлого грунта, при этом скрытая теплота фазовых переходов учитывается обособленно, исходя из допущения о локализации этих процессов строго на фронте промерзания. Однако при экспериментальном определении теплофизических характеристик разделить затраты тепла, расходуемые на нагрев грунта и на плавление льда, невозможно. В связи с этим на основе экспериментальных данных в общем случае определяют величину эффективной теплоемкости» [55].

Таким образом, объемная теплоемкость мерзлых грунтов определяется количественным содержанием компонентов, а эффективная теплоемкость зависит от температуры.

Теплопроводность

Теплопроводность грунтов определяется соотношением твердой, жидкой и газообразной составляющих и их химико-минеральным составом, структурно-текстурными особенностями, влажностью, фазовым состоянием воды и температурой.

В литературе достаточно подробно описана взаимосвязь теплопроводности с физическими показателями грунтов. Основными закономерностями являются [24]:

- резкое возрастание теплопроводности при увеличении степени водонасыщенности;
- возрастание значений теплопроводности при увеличении плотности и, соответственно, уменьшении пористости, что обусловлено увеличением площади пятна контакта между частицами;
- снижение значения коэффициента теплопроводности при присутствии в грунтах органического вещества.

При переходе в область отрицательных температур коэффициент теплопроводности резко возрастает. Объясняется это большей величиной теплопроводности льда по сравнению с водой – 0,6 и 2,2 Вт/(м·°С) соответственно. Однако, в некоторых случаях теплопроводность в мерзлом состоянии может быть меньше либо равна теплопроводности в талом состоянии. Данная особенность отмечается для грунтов с низкой степенью водонасыщения, а также переуплотненных грунтов [111; 136; 165].

Для мерзлых грунтов температура является определяющим фактором при оценке теплопроводности. Наиболее выраженная нелинейная зависимость наблюдается в интервале температур фазового перехода (от температуры начала замерзания до –3 °С), где снижение температуры сопровождается значительным уменьшением содержания незамерзшей воды и увеличением объема льда [54]. Более детальное рассмотрение данной темы приводится в следующей главе.

На Рисунке 18 показан график зависимости теплофизических свойств мерзлых грунтов от температуры, в котором можно выделить следующие характерные участки [55]:

I. Зона талого и переохлажденного грунта с диапазоном от положительной температуры до температуры начала замерзания грунта T_{bf} (при которой замерзает поровая вода в наиболее крупных порах).

II. Зона максимальных фазовых переходов, с диапазоном температур от T_{bf} до температуры начала замерзания связанной воды T_z. Для засоленных грунтов эта зона характеризуется диапазоном температур от начала замерзания порового раствора до температуры окончания вымерзания из раствора чистого пресного льда.

III. Зона замерзания (оттаивания) связанной поровой воды, с интервалом температур от T_{bf} до температуры практически полностью мерзлого состояния грунта T_f, при которой количество незамерзшей воды близко к количеству прочносвязанной воды.

IV. Зона мерзлого грунта с температурой от T_f и ниже.

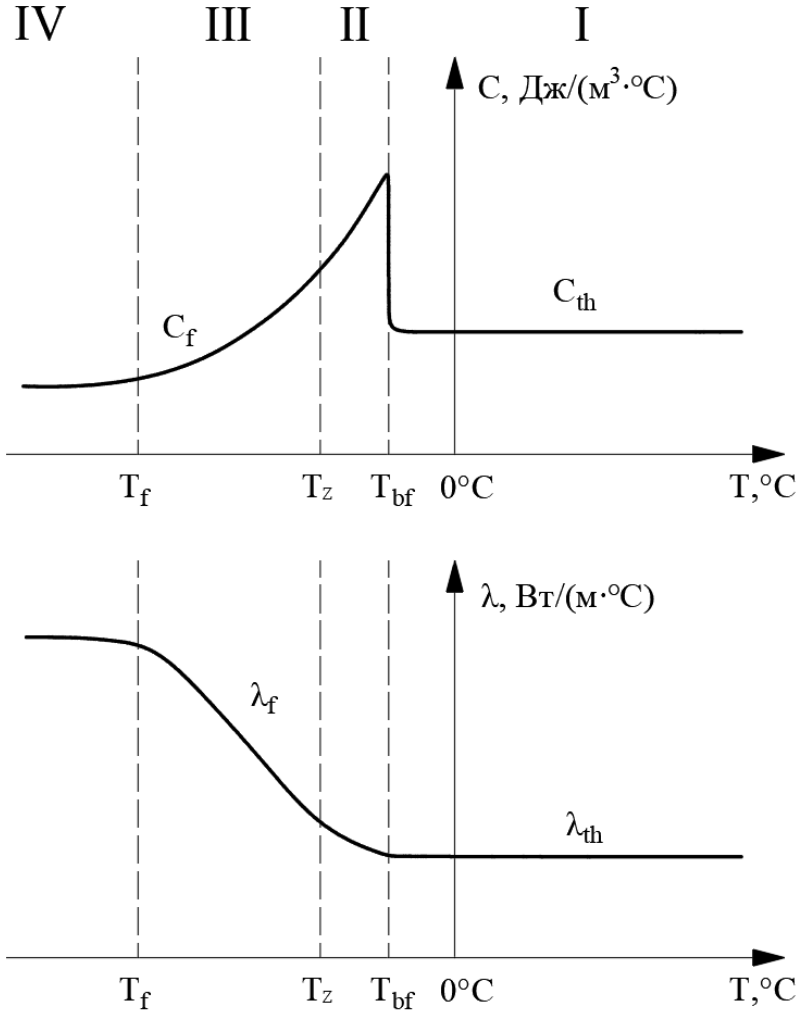


Рисунок 18 – Взаимосвязь изменения теплопроводности и теплоемкости от температуры [55]

В работе Р.И. Гаврильева было отмечено, что теплопроводность как скальных, так и дисперсных грунтов зависит от формы их минеральных частиц. Это объясняется тем, различным «пятном контакта» между частицами, что, в свою очередь, влияет на величину кондуктивного переноса тепла [19].

Отдельный мало изученный вопрос – влияние минерального состава на значение теплопроводности дисперсных грунтов. Существует достаточное количество данных о влиянии минералогического состава горных пород на значения теплопроводности, однако для дисперсных грунтов таких исследований немного [4; 19]. Обусловлено это второстепенным влиянием минералогического состава дисперсных грунтов по отношению к их физическим характеристикам, однако в некоторых работах авторы отмечают значительную зависимость теплопроводности от минерального состава [19;45]. Так при примерно схожих физических

характеристиках песков, в одном случае с содержанием кварца 86,3% (остальную долю составляют полевые шпаты), в другом случае с содержанием кварца 22,8% (полевые шпаты составляют 52%) разница в значениях теплопроводности составляет около 180% [19]. Теплопроводность кварцевого песка – 5,04 Вт/(м·°С) в мерзлом состоянии, 3,19 Вт/(м·°С) – в талом. Теплопроводность полевошпатового песка – 2,78 Вт/(м·°С) в мерзлом состоянии, 1,85 Вт/(м·°С) – в талом. Обусловлено это высокой теплопроводностью кварца – минерала с самым большим коэффициентом теплопроводности из наиболее часто встречаемых минералов, слагающих дисперсные грунты. Теплопроводность кварца по различным данным находится в интервале от 6,0 до 13,0 Вт/(м·°С), в среднем составляя 7,8 Вт/(м·°С) [4; 54]. Теплопроводность же полевого шпата примерна равна от 1,55 до 2,92 Вт/(м·°С) [4].

Лабораторное определение теплопроводности дисперсных и особенно мерзлых грунтов является нетривиальной задачей. Отмечается, значительное расхождение экспериментально определенных теплофизических свойств (до 100% и более) при одинаковых параметрах влажности, плотности скелета и других свойств [24]. Это обусловлено как субъективными, так и объективными причинами.

Объективные причины обусловлены чрезвычайным разнообразием в природе минерального и гранулометрического состава даже в пределах одного и того же вида в зависимости от условий образования отложений, сложным криогенным строением и др. [19; 24].

Субъективные причины включают в себя экспериментальные ошибки инструментального и методического характера [19; 24]. При проведении ИГИ зачастую нарушаются процедуры пробоотбора и консервации образцов, в том числе из-за недостатка необходимого оборудования. Отсутствие контроля за сохранностью естественной структуры проб и изменением их влажности (льдистости) ведет к получению некорректных лабораторных показателей [61]. Поэтому в некоторых случаях лабораторное определение теплофизических свойств грунтов может иметь большие погрешности.

А.Ф. Чудновский справедливо указывает на то, что существующие теории не могут полностью объяснить сложный процесс теплопередачи в дисперсных и подчеркивает важность экспериментальных исследований в этой области [115]. Однако, стоит помнить про высокую сложность лабораторного определения теплофизических свойств грунтов.

В.Г. Чеверев и др. отмечают, что в настоящее время существуют множество экспериментальных методик определения теплопроводности грунтов, каждый из которых имеет свои особенности применения [113]. Лабораторные методы разделяются на три группы: стационарные, нестационарные и комплексные.

Стационарные методы отличаются простотой и строгим теоретическим обоснованием, однако требуют значительного времени для установления стационарного теплового режима и обеспечения защиты от бокового теплообмена.

Нестационарные методы характеризуются сокращенным временем испытаний и простотой обработки результатов, но их применение ограничено в условиях интенсивных фазовых переходов. Отдельные методы предъявляют повышенные требования к условиям проведения эксперимента и могут вызывать нарушения структуры исследуемого образца.

Комплексные методы позволяют проводить измерения в широком диапазоне температур, отличаются высокой оперативностью и возможностью выполнения серийных испытаний. Вместе с тем для них характерны ограничения, связанные с тепловыми потерями, сложностью расчетных зависимостей, недостаточной точностью отдельных параметров и ограниченной применимостью при интенсивных фазовых переходах.

Таким образом, каждый из рассмотренных методов имеет свои преимущества и недостатки, что определяет область его практического применения при исследовании теплофизических свойств грунтов. Из этого следует вопрос сходимости результатов, определенных различными способами. Многие исследователи отмечают, что из-за этого аспекта трудно оценить сходимость предлагаемых экспериментальных и математических моделей формирования теплопроводности дисперсных грунтов [158].

Одной из главных проблем характерных для большинства экспериментальных методов является процесс таяния льда в ходе опыта, в результате чего получаются искаженные результаты (нарушается предположение только кондуктивного теплообмена). Величина таяния льда и перераспределения воды в образце зависит от количества и интенсивности прикладываемого тепла, а также от состояния мерзлого грунта. При использовании меньшего количества тепла или испытании при температуре значительно ниже точки замерзания/оттаивания, ожидается меньшая ошибка в измерениях.

Распространенный в настоящее время метод цилиндрического зонда, требует проведения эксперимента при отрицательной температуре от –5°С и менее [28]. Вследствие этого возникает вопрос о методике определения значения теплопроводности грунтов, находящихся в массиве зачастую при более высоких температурах. Метод стационарного теплового потока, который позволяет испытывать мерзлые грунты при любой температуре с большей точностью, достаточно сложен и дорог и на сегодняшний момент на практике применяется редко.

В связи с вышеупомянутыми факторами ошибок при определении теплопроводности, становится достаточно актуальной задача поиска универсальных зависимостей, отражающих взаимосвязь теплопроводности дисперсных мерзлых и талых грунтов с их физическими характеристиками.

3.2 Анализ существующих моделей теплопроводности мерзлых грунтов

В настоящий момент в практике проведения инженерно-геокриологических исследований, нормативными документами допускается как прямое измерение теплофизических свойств, так и их определение расчетным способом. Так, например, в соответствие с п.5.9 СП 25.13330 расчетные теплофизические характеристики можно использовать при проектировании сооружений пониженного уровня ответственности и сооружений нормального уровня ответственности габаритами не более 24 м, расположенных на геокриологических изученных площадках, сложенных незасоленными грунтами без органических включений, при отсутствии опасных геокриологических процессов, возводимых с сохранением мерзлого состояния грунтов.

В отечественной практике впервые оценочные значения теплопроводности были представлены в нормативном документе НиТУ 118–54 и были основаны на статистической обработке экспериментальных данных, определенных методом стационарного теплового потока [71]. Появление этих данных было обусловлено высокими темпами хозяйственного освоения территорий, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов. Со временем таблица значений теплопроводности дисперсных грунтов трансформировалась: пересматривались значения теплопроводности, постепенно добавлялась информация по засоленным, а также органоминеральным грунтам.

На сегодняшний момент актуальной является эмпирическая таблица, приведенная в СП 25.13330 (таблица Б.8). Данная таблица является обобщением для некоторых разновидностей грунтов, выделенных по классификационным показателям. Так, обобщены характеристики для песков разных фракций, суглинков и глин, заторфованных грунтов, а также для разновидностей грунтов по засоленности. В основе данной таблицы лежит взаимосвязь значений теплопроводности от плотности скелета грунта и его суммарной влажности.

В данной таблице приведены значения коэффициентов теплопроводности незасоленных, засоленных и заторфованных грунтов для талого состояния и мерзлого состояния при температуре –15°С. Для нахождения значений теплопроводности в мерзлом состоянии в диапазоне температур ниже температуры замерзания (T_{bf}), но выше температуры –15°С (T_m) используется следующее соотношение [96]:

$$\lambda_f = \frac{\lambda_{fm} - (\lambda_{fm} - \lambda_{th})[W_w(T) - W_w(T_m)]}{[W_{tot} - W_w(T_m)]}, \quad (3.10)$$

где λ_f, λ_{th} – теплопроводность в мерзлом и талом состоянии соответственно, Вт/(м·°С); W_{tot} – суммарная влажность, д.е.; W_w – влажность за счет незамерзшей воды при соответствующей температуре, д.е.; T – температура грунта, °С; T_m – температура равная –15°С.

Использование данной таблицы, конечно, имеет явные недостатки, главными среди которых являются: отсутствие генезиса и возраста грунтов, отсутствие привязки к

определенному региону, отсутствие верхних и нижних пределов диапазона значений теплопроводности, невозможность учета минерального состава и др.

В нашей стране, помимо вышеотмеченной таблицы, уделялось достаточно мало внимания разработке универсальных формул для оценки теплопроводности. Тем не менее, стоит отметить работы Р.И. Гаврильева, который предложил способы оценки теплопроводности дисперсных грунтов, горных пород, почв и надпочвенных покровов [18; 19].

В зарубежной литературе приводится ряд методов оценки теплопроводности дисперсных грунтов в талом и мерзлом состоянии, получившие широкое распространение в практике, в том числе они интегрированы в программные комплексы по решению теплофизических задач [160; 194]. Данные методы позволяют прогнозировать изменение теплопроводности в зависимости от температуры, водонасыщенности, минерального состава и др. В литературе они описываются как модели теплопроводности. Во всех моделях имеется ряд допущений, упрощающих математическую модель сложного процесса теплопередачи. Стоит отметить, что в отечественной литературе редко встречаются упоминания данных моделей. Проанализировав многочисленные зависимости, можно выделить две основные группы моделей – эмпирические и теоретические. Перечень некоторых моделей, позволяющих оценивать теплопроводность мерзлых грунтов приведен в Таблице 3.

Эмпирические модели получены путем статистической аппроксимации экспериментальных данных, отличаются простотой и легкостью в использовании, однако они не имеют четкого физического объяснения, что делает их менее адаптируемыми для различных типов грунтов.

Теоретические модели основаны на физическом представлении процесса теплопередачи и структуры грунтов и учитывают долю каждого компонента мерзлого грунта (твердых частиц, воды, льда и воздуха). В эту группу можно отнести и некоторые зависимости являющимися полуэмпирическими, т.е. частично модифицирующие теоретические модели.

Среди прочих моделей, не указанных в таблице, можно отметить множество других работ [127; 137; 139; 154; 171; 174; 176; 177; 184; 185; 186; 188; 196; 199; 213]. Стоит отметить, что в современных исследованиях наблюдается дисбаланс – модели теплопроводности талых (немерзлых) грунтов разработаны значительно лучше нежели модели для мерзлых грунтов.

Таблица 3 – Модели теплопроводности дисперсных мерзлых грунтов

№ п.п.	Авторы	Формулы	Примечание
Эмпирические модели			
1	Kersten (1949) [165]	Мелкодисперсные грунты (суглинки, глины): $\lambda_{th} = 0,144\left(0,9\log W - 0,2\right)10^{0,6243\rho_d}$; $\lambda_f = 0,00144\cdot 10^{1,373\rho_d} + 0,01226\cdot 10^{0,499\rho_d}\cdot W$ Крупнодисперсные грунты (пески, супеси): $\lambda_{th} = 0,1442\left(0,7\log W + 0,4\right)10^{0,6243\rho_d}$; $\lambda_f = 0,01096\cdot 10^{0,811\rho_d} + 0,00461\cdot 10^{0,912\rho_d}\cdot W$	Один из первых способов оценки теплопроводности грунтов, представленный в зарубежной литературе. Простота зависимости накладывает серьезные ограничения в ее применении.
2	Johansen (1975) [162]	$\lambda_{th,f} = \left(\lambda_{sat} - \lambda_{dry}\right)k_e + \lambda_{dry}$	Одна из наиболее часто используемых моделей в зарубежных исследованиях. Ограничение модели – грунты с низкой степенью водонасыщения.
3	Yamazaki et al. (2003) [215]	$\lambda_{th,f} = \left(\lambda_{sat} - \lambda_{dry}\right)(0,22S_r - 0,02) + \lambda_{dry}$	Модификации модели Johansen, разработанные для получения более точных значений теплопроводности для грунтов с низкой степенью водонасыщения.
4	Verseghy (1991) [208]	$\lambda_{th,f} = \left(\lambda_{sat} - \lambda_{dry}\right)\frac{W}{n} + \lambda_{dry}$	
5	Wang et al. (2017) [210]	$\lambda_f = \lambda_{dry} + \left(\lambda_{sat} - \lambda_{dry}\right)\exp\left[0,36(1-\frac{1}{W})\right] + \lambda_i$	
6	Cote and Konrad (2005) [136]	$\lambda_{th,f} = \left[\lambda_{sat} - (\chi\cdot 10^{-\eta n})\right]\frac{\kappa S_r}{1+(\kappa-1)S_r} + (\chi\cdot 10^{-\eta n})$	
7	Becker et al. (1992) [128]	$\lambda_{th,f} = \left\{\log\left[\frac{\left[S_r/a_1 + \mathrm{Sinh}(a_4)\right] + }{\sqrt{\left[S_r/a_1 + \mathrm{Sinh}(a_4)\right]^2 + 1}}\right] - a_3\right\}/a_2$	Эмпирические коэффициенты строго привязаны к зарубежной классификации грунтов.
8	Хрусталев [108]	Песчаные грунты: $\lambda_{th} = -1,99 + 0,00206\cdot\rho_{th} + \lg(10W)$ $\lambda_f = (-1,91 + 0,0023\cdot\rho_f + 2,05\cdot\lg(10W_m))\cdot$ $\cdot(1-i_i) + 2,22\cdot i_i$ Супеси: $\lambda_{th} = -1,0 + 0,0011\cdot\rho_{th} + 1,47\cdot\lg(10W)$; $\lambda_f = (-1,0 + 0,00114\cdot\rho_f + 1,47\cdot\lg(10W_m))\cdot\rho_f$ Суглинки и глины: $\lambda_{th} = -0,68 + 0,00089\cdot\rho_{th} + 0,98\cdot\lg(10W)$; $\lambda_f = (-0,86 + 0,00107\cdot\rho_f + 0,98\cdot\lg(10W_m))\cdot$ $\cdot(1-i_i) + 2,22\cdot i_i$	Автором не указано каким образом были получены данные зависимости, а также их верификация.

Продолжение Таблицы 3

№ п.п.	Авторы	Формулы	Примечание
Теоретические модели			
9	De Vries (1963) [138]	$\lambda_{th} = \frac{\theta_w\lambda_w + F_s\theta_s\lambda_s + F_a\theta_a\lambda_a}{\theta_w + F_s\theta_s + F_a\theta_a}$	Модель разработана для талых грунтов на основе уравнения Максвелла для электропроводности смеси сыпучих материалов, диспергированных в жидкости. Грунт представлен как смесь эллипсоидальных частиц в непрерывной среде, состоящей из воздуха и воды.
10	Penner (1970) [187]	$\lambda_f = \frac{\theta_w\lambda_w F_w + \theta_i\lambda_i F_i + \theta_s\lambda_s F_s}{\theta_w F_w + \theta_i F_i + \theta_s F_s}$	Первая модификация модели De Vries для мерзлых грунтов с высокой степенью водонасыщения.
11	Farouki (1982) [144]	$\lambda_{th} = \frac{\theta_w\lambda_w + F_a\theta_a\lambda_a + F_s\lambda_s(1-n)}{\theta_w + F_a\theta_a + F_s(1-n)}$; $\lambda_f = \frac{\theta_u\lambda_w + F_i\theta_i\lambda_i + F_a\theta_a\lambda_a + F_s\lambda_s(1-n)}{\theta_u + F_i\theta_i + F_a\theta_a + F_s(1-n)}$	Модификация модели De Vries как для мерзлых, так и талых грунтов. Одна из наиболее распространенных моделей в зарубежных исследованиях.
12	Tian et al. (2016) [205]	$\lambda_{th,f} = \frac{\theta_w\lambda_w + F_i\theta_i\lambda_i + F_a\theta_a\lambda_a + F_s\theta_s\lambda_s}{\theta_w + F_i\theta_i + F_a\theta_a + F_s\theta_s}$	Модификация модели Farouki. В модели используются иной подход к определению коэффициентов F, а также теплопроводности частиц грунта
13	Zhang et al. (2018) [219]	$\lambda_{th,f} = \lambda_s^{\theta_s}\lambda_i^{\theta_i}\lambda_w^{\theta_w}\lambda_a^{\theta_a}$	Теплопроводность определяется через средневзвешенные (геометрические) доли компонентов грунта.
14	Гаврильев, Кузьмин (2009) [18]	$\lambda_f = \frac{\rho_i(\rho_w + W_w\rho_s)}{[\rho_w\rho_i + W_w\rho_s\rho_i + (W_{tot} - W_w)\rho_s\rho_w]} \cdot \frac{\left[\lambda_w - \lambda_i - \frac{\rho_w(\lambda_w - \lambda_s)(2\lambda_w + \lambda_i)}{(2\rho_w + w_w\rho_s)(2\lambda_w + \lambda_s)}\right]}{\left[2\lambda_i + \lambda_w + \frac{2\rho_w(\lambda_w - \lambda_s)(2\lambda_i + \lambda_w)}{(\rho_w + w_w\rho_s)(2\lambda_w + \lambda_s)}\right]}$	Авторами не приведены способы оценки теплопроводности частиц грунта. Формула применима для водонасыщенных мерзлых грунтов.
Физические характеристики грунтов: W – весовая влажность (для мерзлых грунтов суммарная); W_w – весовая влажность за счет незамерзшей воды; W_m – влажность талого грунта и влажность мерзлого грунта между ледяными включениями; ρ_{th}, ρ_f – плотность соответственно талого и мерзлого грунта; ρ_d – плотность скелета грунта; ρ_i, ρ_w, ρ_s – плотность льда, воды и частиц грунта соответственно; i_i – льдистость за счет видимых включений; S_r – степень водонасыщения; n – пористость; θ_w, θ_u θ_i, θ_s, θ_a – объемная доля воды, незамерзшей воды, льда, частиц и воздуха соответственно. ***Теплофизические характеристики:*** λ_{th}, λ_f, – коэффициент теплопроводности соответственно талого и мерзлого грунта; λ_w, λ_i, λ_s, λ_a – теплопроводности воды, льда, частиц и воздуха соответственно. ***Другие параметры:*** λ_{sat}, λ_{dry}, η, κ, χ, a, F_s, F_a, F_w, F_i – коэффициенты и параметры моделей, определяющихся различными способами исходя из физических характеристик грунтов.		

Многие вышеперечисленные модели включают в себя теплопроводности всех компонентов грунтов – воды, льда, воздуха и частиц грунта. Если значения теплопроводности первых трех компонентов широко известны и их вариативностью можно пренебречь (ввиду небольшой величины отклонения, например зависимостью теплопроводности жидкой воды или льда от температуры), то вопрос определения теплопроводности частиц грунта является нетривиальным. Данную проблему можно решить, путем экспериментального определения минералогического состава (что также актуально для определения удельной теплоемкости частиц грунта), ввиду того что теплопроводности конкретных минералов достаточно хорошо известны [4; 54]. Однако минералогический состав дисперсных грунтов в практике ИГИ не определяется. В связи с этим, различными авторами было предложено оценивать теплопроводность частиц двумя методами – по содержанию кварца (как наиболее распространенного минерала в дисперсных грунтах и имеющего наибольшую из всех основных минералов теплопроводность), и гранулометрическому составу (что является косвенным учетом минерального состава). Безусловно, экспериментально измеренное фактическое содержание кварца улучшает качество моделей теплопроводности мерзлого грунта [202]. Способы оценки величины теплопроводности частиц указаны в Таблице 4.

О. Йохансен [162] предложил оценивать содержание кварца в зависимости от разновидности грунта, а также указал насколько может варьироваться значение теплопроводности за счет ошибки оценки содержания кварца. Среднее содержание кварца для разновидностей дисперсных грунтов приведено в Таблице 5.

Таким образом, автор обращает внимание, что для грунтов с высоким содержанием песчаных частиц (в отечественной классификации прежде всего пески и супеси), важным фактором при оценке теплопроводности является вклад, обусловленный минеральным составом и теплопроводностью самих частиц.

Во многих литературных источниках [7; 94; 117; 147] отмечается, что содержание кварца в песчаных грунтах сильно варьируется и может изменятся от первых процентов до 90 % и выше (кварцевые пески). Также отмечается широкий диапазон содержаний кварца и в глинистых грунтах – от первых процентов вплоть до 70% (преимущественно в супесях). Это обусловлено высокой устойчивостью кварца к выветриванию, а также широкой распространенностью кварца в большинстве материнских горных пород.

Современные исследования эффективности моделей теплопроводности дисперсных мерзлых грунтов демонстрируют, что ни одна из существующих моделей не обеспечивает универсально высокую точность для всех типов грунтов. Наилучшая сходимость с экспериментальными данными достигается разными моделями в зависимости от особенностей строения и состава грунтов [158; 159; 193; 214].

Таблица 4 – Методы оценки величины теплопроводности частиц грунта

№ п.п.	Формулы	Используемая модель
1	$\lambda_s = 7,7^{q}(2,0)^{1-q}$ при q> 20%, $\lambda_s = 7,7^{q}(3,0)^{1-q}$, при q≤ 20%, где q – содержание кварца, д.е. Содержание кварца может быть оценено как: $q = 0,5f_{sand}$; $q = 0,5\left(f_{sand} + f_{silt}\right)$; $q = f_{sand}$, где f_{sand} – содержание песчаных частиц, f_{silt} – содержание пылеватых частиц, f_{clay} – содержание глинистых частиц	Johansen (1975) [162]
2	$\lambda_s = \prod_j \lambda_{mj}^{x_j}$, где $\sum_j x_j = 1$, λ_m – теплопроводность каждого минерала Вт/м·°С	Cote and Konrad (2005) [136]
3	$\lambda_s = \left[\left(8,8f_{sand} + 2,92\ f_{clay}\right)/\left(f_{sand} + f_{clay}\right)\right]$, где f_{sand} – содержание песчаных частиц, f_{clay} – содержание глинистых частиц	Farouki (1986) [145]
4	$\lambda_s = \lambda_{sand}^{f_{sand}}\lambda_{silt}^{f_{silt}}\lambda_{clay}^{f_{clay}}$, где f_{sand} – содержание песчаных частиц; f_{silt} – содержание глинистых частиц; f_{clay} – содержание глинистых частиц; λ_{sand}=7,7 Вт/м·°С, λ_{silt}=2,74 Вт/м·°С, λ_{clay}=1,93 Вт/м·°С – теплопроводность песчаных, пылеватых и глинистых частиц соответственно	Tian et al. (2016) [205]
5	λ= const = 2,45 Вт/м·°С	Zhang et al. (2018) [219]
Примечание: за содержание каждой фракции принимаются частицы с размерами: песчаных частиц (f_{sand}) 2,0–0,05 мм, пылеватых частиц (f_{silt}) 0,05–0,002 мм, глинистых частиц (f_{clay}) менее 0,002 мм.		

Этот аспект обусловлен как принципиальными ограничениями самих методов, так и сложностями при их сопоставлении с существующими базами данных. Значительную неопределенность вносит региональный фактор используемых выборок грунтов. Кроме того, сама методика экспериментального определения теплопроводности может отличаться, что также влияет на точность полученных результатов. Также заслуживает внимания вопрос учета незамерзшей воды в моделях, о чем подробно будет рассказано в Главе 4.

Определение теплопроводности органических и органоминеральных мерзлых грунтов представляет собой отдельную задачу. Низкая плотность скелета, высокая пористость и льдистость, значительное содержание органического вещества приводят к тому, что стандартные модели теплопроводности, разработанные для минеральных грунтов, демонстрируют низкую точность при описании этих разновидностей. В связи с этим были разработаны специализированные модели, учитывающие особенности органических грунтов [136; 144; 162].

Таблица 5 – Рекомендуемое содержание кварца и максимальная вариативность теплопроводности от минерального состава по методу Йохансена [162]

Разновидность грунта	Среднее содержание кварца, %	Разброс значений теплопроводности, за счет вариативности содержания кварца, %
Sand	92	55,2
Loamy sand	82	52,9
Sandy loam	60	49,2
Sandy clay loam	60	48,4
Sandy clay	52	46,2
Loam	40	35,0
Clay loam	35	34,2
Silt loam	25	25,1
Clay	25	26,8
Silty clay	10	17,3
Silty clay loam	10	22,9
Silt	10	17,3
Peat	0	–

Подводя итоги, можно выделить следующие преимущества использования математических моделей по оценке теплопроводности мерзлых грунтов:

- Возможность учета минерального состава.
- Использование комплекса физических характеристик мерзлых грунтов (пористости, степени водонасыщения, плотности скелета, плотности грунта, весового или объемного содержания компонентов грунта и др.).
- Прогнозирование значений теплопроводности как в талом, так и в мерзлом состоянии, а также при изменении температуры и физических свойств грунтов.
- Относительная простота использования моделей.

К недостаткам стоит отнести:

- Использование в некоторых моделях классификационных показателей грунтов, не сопоставимых с отечественной классификацией.
- Зависимости часто получены на основе региональных выборок грунтов малого размера.
- Плохая сходимость результатов для засоленных и заторфованных грунтов.
- Неопределенность полученных авторами результатов из-за разного способа учета содержания незамерзшей воды и минералогического состава.

В приведенной Таблице 3 по большей части отражены наиболее распространенные и успешные модели, применимые для мерзлых и талых дисперсных грунтов. Стоит отметить, что

большинство моделей являются модификациями двух методик – Йохансена (Johansen, эмпирические модели) и де Вриса (De Vries, теоретические модели).

Метод Йохансена признан в литературе одним из лучших способов прогнозирования теплопроводности грунтов [140; 145; 218]. В последующие годы различные исследователи модифицировали модель лишь для грунтов с низкой степенью водонасыщения. В свою очередь наиболее успешной модификацией модели де Вриса является модель Фаруки, позволяющая прогнозировать теплопроводность как в талом, так и мерзлом состоянии, которая в дальнейшем также была модифицирована различными авторами.

3.3 Оценка эффективности моделей теплопроводности

Часть представленных ниже результатов ранее опубликована автором в работах [64; 65; 68] и в настоящей главе данные результаты дополнены и уточнены.

Модели Фаруки (теоретическая модель) и Йохансена (эмпирическая модель) являются наиболее цитируемыми и широко применяемыми в современных исследованиях, посвященных сравнительному анализу методов оценки теплопроводности дисперсных мерзлых грунтов [65; 144; 158; 159; 214]. Кроме того, они реализованы в современных программных комплексах для численного решения теплофизических задач [159; 194]. В связи с этим далее приведено подробное описание обеих моделей, а также показана эффективность их применения.

Модель Йохансена разработана для определения коэффициента теплопроводности талых и мерзлых грунтов на основе теплопроводности грунта в сухом и водонасыщенном состоянии и применим для грунтов со степенью водонасыщения (S_r) более 20%.

В общем виде теплопроводность определяется по следующей зависимости:

$$\lambda = \left(\lambda_{sat} - \lambda_{dry}\right) k_e + \lambda_{dry}, \tag{3.11}$$

где λ – теплопроводность грунта, Вт/(м·°С); λ_{sat} и λ_{dry} – теплопроводность водонасыщенного и сухого грунта соответственно, Вт/(м·°С); k_e – число Керстена, д.е.

Параметры λ_{sat} и λ_{dry} вычисляются по формулам:

$$\lambda_{dry} = \frac{0{,}135\rho_d + 64{,}7}{\rho_s - 0{,}947\rho_d}, \tag{3.12}$$

$$\lambda_{sat} = (\lambda_s)^{1-n}(\lambda_w)^n, \text{ для талого грунта} \tag{3.13}$$

$$\lambda_{sat} = (\lambda_s)^{1-n}(\lambda_i)^{n-\theta_u}(\lambda_w)^{\theta_u}, \text{ для мерзлого грунта} \tag{3.14}$$

$$\lambda_s = \lambda^q{}_q \lambda^{1-q}{}_0. \tag{3.15}$$

Число Керстена k_e (д.е.) вычисляется по следующим формулам:

$k_e = 0{,}7\log(S_r) + 1{,}0$, для талого грунта с содержанием глинистых частиц <5%, (3.16)

$k_e = \log(S_r) + 1{,}0$, для талого грунта с содержанием глинистых частиц >5%, (3.17)

$k_e = S_r$, для мерзлого грунта. (3.18)

В приведенных формулах (3.12–3.18): ρ_d – плотность сухого грунта кг/м^3; ρ_s – плотность частиц грунта, кг/м^3; n – пористость, д.е.; λ_w, λ_i, λ_s – теплопроводности воды, льда и твердых частиц соответственно, Вт/(м·°С); θ_u – объемное содержание незамерзшей воды д.е.; S_r – степень водонасыщения, д.е.

При различном содержании кварца в грунте, теплопроводность частиц грунта определяется по следующим формулам:

$$\lambda_s = 7{,}7^q (2{,}0)^{1-q}, \text{ при } q>20\%, \quad (3.19)$$

$$\lambda_s = 7{,}7^q (3{,}0)^{1-q}, \text{ при } q<20\%. \quad (3.20)$$

Стоит отметить, что в методике предложенной Йохансеном существует основное ограничение – число Керстена (k_e) будет отрицательным для грунтов с низкой водонасыщенностью (менее 0,2).

В методе предложенным Фаруки теплопроводность грунтов оценивается на основе средневзвешенного значения теплопроводности составляющих грунта (лед, вода, воздух, твердые частицы):

$$\lambda_{th} = \frac{\theta_w \lambda_w + F_a \theta_a \lambda_a + F_s \lambda_s (1-n)}{\theta_w + F_a \theta_a + F_s (1-n)}, \quad (3.21)$$

$$\lambda_f = \frac{\theta_u \lambda_w + F_i \theta_i \lambda_i + F_a \theta_a \lambda_a + F_s \lambda_s (1-n)}{\theta_u + F_i \theta_i + F_a \theta_a + F_s (1-n)}, \quad (3.22)$$

где λ_{th}, λ_f – теплопроводность талого и мерзлого грунта соответственно, Вт/(м·°С); λ_w, λ_a, λ_i, λ_s – теплопроводности воды, воздуха, льда и твердых частиц соответственно, Вт/(м·°С); θ_w, θ_i, θ_u – объемное содержание воды, льда, и незамерзшей воды соответственно, д.е.; n – пористость, д.е; F_a, F_s, F_i – коэффициенты геометрии пор, g_a и g_c – эмпирические коэффициенты.

Коэффициенты геометрии пор – F_a, F_s, F_i, а также коэффициенты g_a и g_c определяются по формулам:

$$F_a = \frac{1}{3}\left\{\frac{2}{1+g_a\left(\lambda_a/\lambda_w - 1\right)} + \frac{1}{1+g_c\left(\lambda_a/\lambda_w - 1\right)}\right\}, \quad (3.23)$$

$$F_s = \frac{1}{3}\left\{\frac{2}{1+0{,}125\left(\lambda_s/\lambda_w - 1\right)} + \frac{1}{1+0{,}75\left(\lambda_s/\lambda_w - 1\right)}\right\}, \quad (3.24)$$

$$F_i = \frac{1}{3}\left\{\frac{2}{1+0{,}125\left(\lambda_i/\lambda_w - 1\right)} + \frac{1}{1+0{,}75\left(\lambda_i/\lambda_w - 1\right)}\right\}, \quad (3.25)$$

$$g_a = 0,035 + 0,298 \cdot S_r, \quad (3.26)$$

$$g_c = 1 - 2g_a, \quad (3.27)$$

где S_r – степень водонасыщения, д.е.

В модели Фаруки теплопроводность частиц определяется как:

$$\lambda_s = \left[\left(8,8f_{sand} + 2,92\ f_{clay}\right) / \left(f_{sand} + f_{clay}\right)\right], \quad (3.28)$$

где f_{sand} – содержание песчаных частиц, д.е.; f_{clay} – содержание глинистых частиц, д.е.

Также автором допускается оценивать теплопроводность частиц аналогично методу Йохансена (3.19; 3.20).

В приведенных моделях теплопроводность воды (λ_w) принимается = 0,57 Вт/(м·°С), льда (λ_i) = 2,2 Вт/(м·°С), воздуха (λ_a) = 0,025 Вт/(м·°С).

Для демонстрации работы двух основных моделей – Йохансена и Фаруки, ниже представлены результаты расчетов теплопроводности для выборки из 20 образцов незасоленных и незаторфованных глинистых и песчаных грунтов, озерно-аллювиального генезиса, отобранных на участке строительства в Ямало-Ненецком автономном округе.

Исходные данные были предоставлены коллективом исследователей сектора лабораторных исследований мерзлых грунтов НИИОСП им. Н.М. Герсеванова. Основные исходные данные о физических свойствах грунтов и экспериментально определенных коэффициентах теплопроводности приведены в Таблице 6.

Теплопроводность грунтов определялась методом цилиндрического зонда (KD–2 Pro) при температуре –15°С для мерзлого состояния и +20°С для талого состояния. Стоит отметить, что приведенные экспериментальные значения теплопроводности являются средними значениями, определенными как минимум в трех опытах.

Как уже упоминалось ранее, помимо фундаментальных ограничений, использование моделей связано с следующими неопределенностями – это использование теплопроводности частиц грунта и содержания незамерзшей воды.

Теплопроводность образцов была определена при низкой отрицательной температуре, поэтому неопределенностью в учете содержания незамерзшей воды от температуры в данном случае можно пренебречь. В данном случае она учитывалась по формуле, приведенной в СП 25.13330 для температуры грунта –15°С:

$$W_w = k_w W_P, \quad (3.29)$$

где k_w – эмпирический коэффициент, принимаемый в зависимости от числа пластичности и температуры грунта; W_P – влажность грунта на границе пластичности, д.е.

Таблица 6 – Основные физические характеристики рассматриваемых образцов грунта

№	Наименование грунта	Содержание частиц 2,0-0,05 мм, %	Содержание частиц 0,05-0,002 мм, %	Содержание частиц мене 0,002 мм, %	Влажность суммарная, %	Влажность за счет незам.воды (при Т=-15°С), %	Плотность сухого грунта, г/см^3	Пористость, %	Степень заполнения пор льдом и незамерзшей водой, д.е.	К-т теплопроводности в мерзлом состоянии, Вт/(м·°С)	К-т теплопроводности в талом состоянии, Вт/(м·°С)
		$d_{2-0,05}$	$d_{0,05-0,002}$	$d_{<0,002}$	W_{tot}	W_w	ρ_d	n	Sr	λ_f	λ_{th}
1	Супесь пылеватая нельдистая	38,0	51,3	10,7	17,7	4,0	1,61	0,40	0,76	2,08	1,46
2	Супесь пылеватая слабольдистая	25,9	63,4	10,7	18,4	3,6	1,63	0,39	0,81	2,48	1,71
3	Супесь пылеватая льдистая	25,2	65,0	9,8	37,9	4,5	1,23	0,54	0,94	2,22	1,27
4	Супесь пылеватая слабольдистая	40,7	49,6	9,7	29,1	4,5	1,45	0,46	0,98	3,40	1,92
5	Супесь пылеватая нельдистая	25,2	58,1	16,7	17,7	4,4	1,61	0,40	0,76	2,14	1,48
6	Супесь песчанистая слабольдистая	54,7	37,2	8,1	17,6	3,7	1,66	0,38	0,82	2,62	1,80
7	Суглинок пылеватый легкий слабольдистый	35,1	54,7	10,2	24,0	7,4	1,47	0,45	0,82	2,15	1,51
8	Суглинок пылеватый легкий слабольдистый	17,3	68,8	13,9	30,5	7,9	1,46	0,46	1,00	2,40	1,58
9	Суглинок пылеватый легкий слабольдистый	24,7	51,1	24,2	24,1	6,8	1,51	0,43	0,88	2,42	1,81
10	Суглинок пылеватый легкий слабольдистый	27,4	47,3	25,3	23,2	7,0	1,59	0,40	0,96	2,22	1,56
11	Суглинок легкий нельдистый	24,6	53,0	22,4	14,7	7,1	1,67	0,38	0,66	1,94	1,41
12	Суглинок пылеватый легкий нельдистый	25,1	48,5	26,4	19,2	7,1	1,74	0,35	0,98	2,33	1,74
13	Суглинок пылеватый легкий слабольдистый	26,2	57,9	15,9	30,5	7,6	1,46	0,46	1,00	2,38	1,49
14	Суглинок легкий слабольдистый	24,6	61,8	13,6	30,7	7,9	1,38	0,49	0,93	2,17	1,50
15	Глина пылеватая легкая нельдистая	5,3	38,1	56,6	36,5	17,7	1,32	0,52	0,95	1,74	1,27
16	Песок мелкий однородный слабольдистый	94,0	4,0	2,0	21,3	0,0	1,63	0,39	0,98	3,63	1,92
17	Песок мелкий однородный слабольдистый	94,0	5,0	1,0	20,5	0,0	1,62	0,40	0,92	3,91	2,15
18	Песок пылеватый неоднородный слабольдистый	77,5	16,6	5,9	22,2	0,0	1,64	0,39	1,00	3,11	1,94
19	Песок пылеватый неоднородный слабольдистый	81,7	16,7	1,6	20,4	0,0	1,57	0,41	0,85	2,92	2,01
20	Песок пылеватый неоднородный слабольдистый	76,7	18,4	4,9	24,4	0,0	1,45	0,46	0,86	3,31	1,81

Ввиду отсутствия сведений о минералогическом составе рассматриваемых образцов, для оценки способа учета минерального состава на теплопроводность частиц и, следовательно, на общую величину теплопроводности, были проведены расчеты для обоих моделей следующими способами:

$$\lambda_s = \lambda_{sand}^{f_{sand}} \lambda_{silt}^{f_{silt}} \lambda_{clay}^{f_{clay}}, \quad (3.30)$$

где f_{sand}, f_{silt}, f_{clay} – содержание песчаных, пылеватых и глинистых частиц соответственно, %; λ_{sand}=7,7 Вт/(м·°С), λ_{silt}=2,74 Вт/(м·°С), λ_{clay}=1,93 Вт/(м·°С) – теплопроводность песчаных, пылеватых и глинистых частиц соответственно.

$$\lambda_s = \left[\left(8,8 f_{sand} + 2,92\ f_{clay}\right) / \left(f_{sand} + f_{clay}\right)\right], \quad (3.31)$$

где f_{sand} – содержание песчаных частиц, %; f_{clay} – содержание глинистых частиц

$$\lambda_s = 7,7^{q}(2,0)^{1-q}, \text{при } q > 20\%;\ \lambda_s = 7,7^{q}(3,0)^{1-q}, \text{при } q \le 20\%; \quad (3.32)$$

где q – содержание кварца, определяемое как: $q=0,5f_{sand}$; $q=0,5(f_{sand}+f_{silt})$; $q=f_{sand}$

$$\lambda_s = \text{const} = 2,45 \text{ Вт/(м·°С)}. \quad (3.33)$$

Таким образом, для каждого образца двумя моделями было получено по 6 значений теплопроводности для мерзлого и талого состояния.

Далее определены статистические критерии, позволяющие оценить эффективность моделей на основе выборки грунтов:

1. Корень из среднеквадратической ошибки (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n} (M_j - P_j)^2}{n}}. \quad (3.34)$$

2. Коэффициент Нэша – Сатклиффа (NSE):

$$NSE = 1 - \sum_{i-1}^{n} \left(P_j - M_j\right)^2 / \sum_{i-1}^{n} \left(P_j - M_{mean-j}\right)^2, \quad (3.35)$$

где M_j – экспериментально определенное значение теплопроводности; M_{mean-j} – среднее экспериментальное значение; P_j – ожидаемое моделью значение теплопроводности, n – количество определений.

Результаты статистического анализа для грунтов в мерзлом и талом состоянии приведены в Таблицах 7,8. Рассчитанные исходные значения теплопроводностей для рассматриваемых моделей приведены в Таблицах 10,11.

Таблица 7 – Эффективность моделей теплопроводности для мерзлого грунта

№	Метод учета теплопроводности частиц		Модель Йохансена		Модель Фаруки	
			RMSE	NSE	RMSE	NSE
1	$\lambda_s = \lambda_{sand}^{f_{sand}} \lambda_{silt}^{f_{silt}} \lambda_{clay}^{f_{clay}}$		0,384	0,56	0,264	0,79
2	$\lambda_s = \left[\left(8,8f_{sand} + 2,92\ f_{clay}\right) / \left(f_{sand} + f_{clay}\right)\right]$		1,012	–2,05	0,649	–0,26
3	$\lambda_s = 7,7^{q}(2,0)^{1-q}$, при q> 20%; $\lambda_s = 7,7^{q}(3,0)^{1-q}$, при q≤ 20%	$q = 0,5f_{sand}$	0,355	0,62	0,496	0,27
4		$q = 0,5\left(f_{sand} + f_{silt}\right)$	**0,329**	**0,68**	0,459	0,37
5		$q = f_{sand}$	0,420	0,47	0,333	0,67
6	$\lambda_s = \text{const} = 2,45$ Вт/м·°С		0,787	–0,85	0,716	–0,53

Таблица 8 – Эффективность моделей теплопроводности для талого грунта

№	Метод учета теплопроводности частиц		Модель Йохансена		Модель Фаруки	
			RMSE	NSE	RMSE	NSE
1	$\lambda_s = \lambda_{sand}^{f_{sand}} \lambda_{silt}^{f_{silt}} \lambda_{clay}^{f_{clay}}$		0,283	–0,37	0,267	–0,21
2	$\lambda_s = \left[\left(8,8f_{sand} + 2,92\ f_{clay}\right) / \left(f_{sand} + f_{clay}\right)\right]$		0,740	–8,33	0,720	–7,84
3	$\lambda_s = 7,7^{q}(2,0)^{1-q}$, при q> 20%; $\lambda_s = 7,7^{q}(3,0)^{1-q}$, при q≤ 20%	$q = 0,5f_{sand}$	0,162	0,55	0,191	0,38
4		$q = 0,5\left(f_{sand} + f_{silt}\right)$	**0,147**	**0,63**	0,164	0,54
5		$q = f_{sand}$	0,291	–0,44	0,264	–0,19
6	$\lambda_s = \text{const} = 2,45$ Вт/м·°С		0,429	–2,13	0,359	–1,20

В дополнение к рассматриваемым моделям были определены статистические параметры сходимости экспериментальных результатов с методом отраженном в СП 22.13330 (Таблица 9).

Таблица 9 – Эффективность определения теплопроводности по методу СП 25.13330

№	Состояние грунта	RMSE	NSE
1	Мерзлое	0,721	–0,55
2	Талое	0,237	0,04

По совокупности полученных значений теплопроводности в мерзлом и талом состоянии, наилучшим способом учета теплопроводности частиц является Метод 4 при использовании модели Йохансена Графики, отражающие распределение полученных значений теплопроводности приведены на Рисунках 19–22.

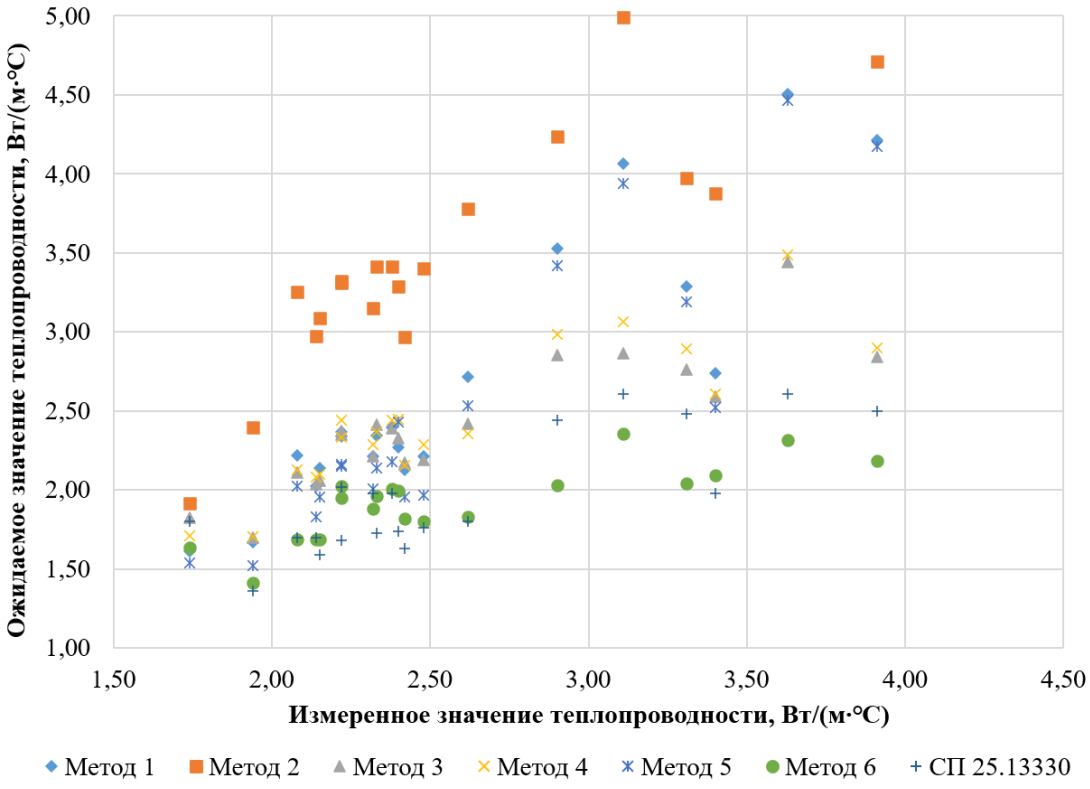


Рисунок 19 – Значения теплопроводности модели Йохансена, в зависимости от способа учета теплопроводности частиц, а также согласно СП 25.13330 для грунтов в мерзлом состоянии

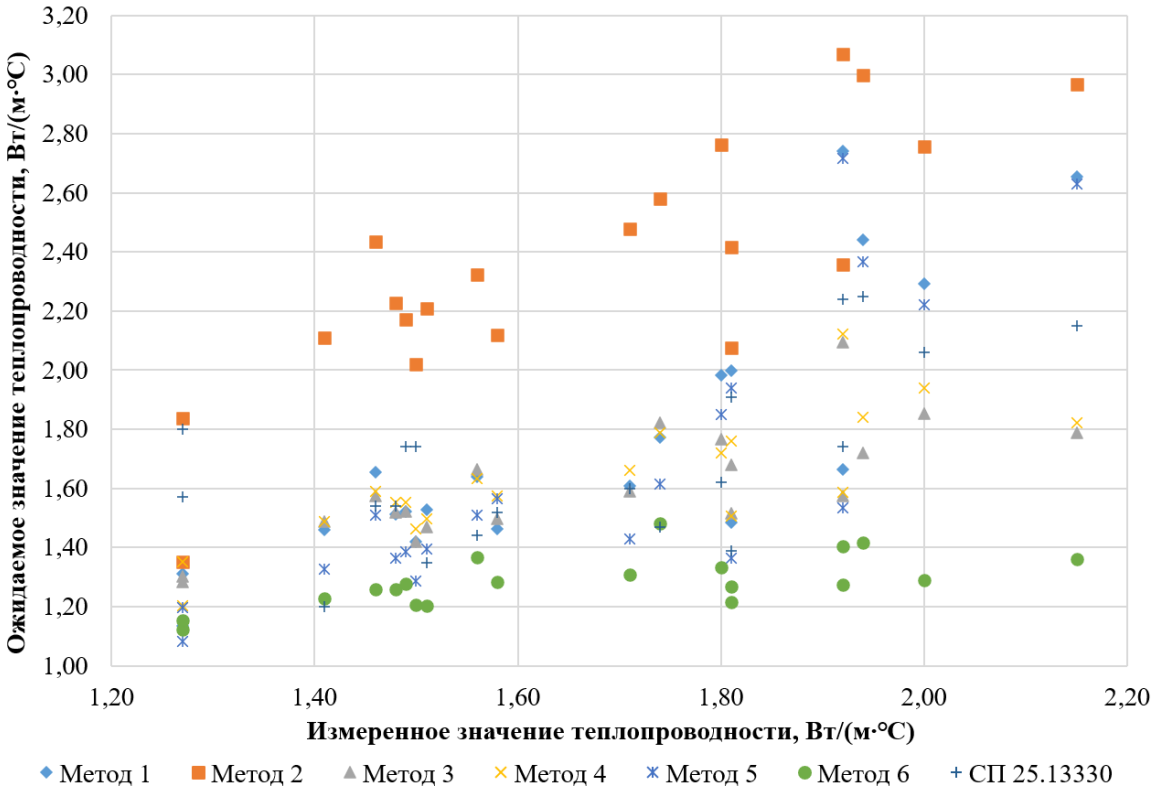


Рисунок 20 – Значения теплопроводности в модели Йохансена, в зависимости от способа учета теплопроводности частиц, а также согласно СП 25.13330 для грунтов в талом состоянии

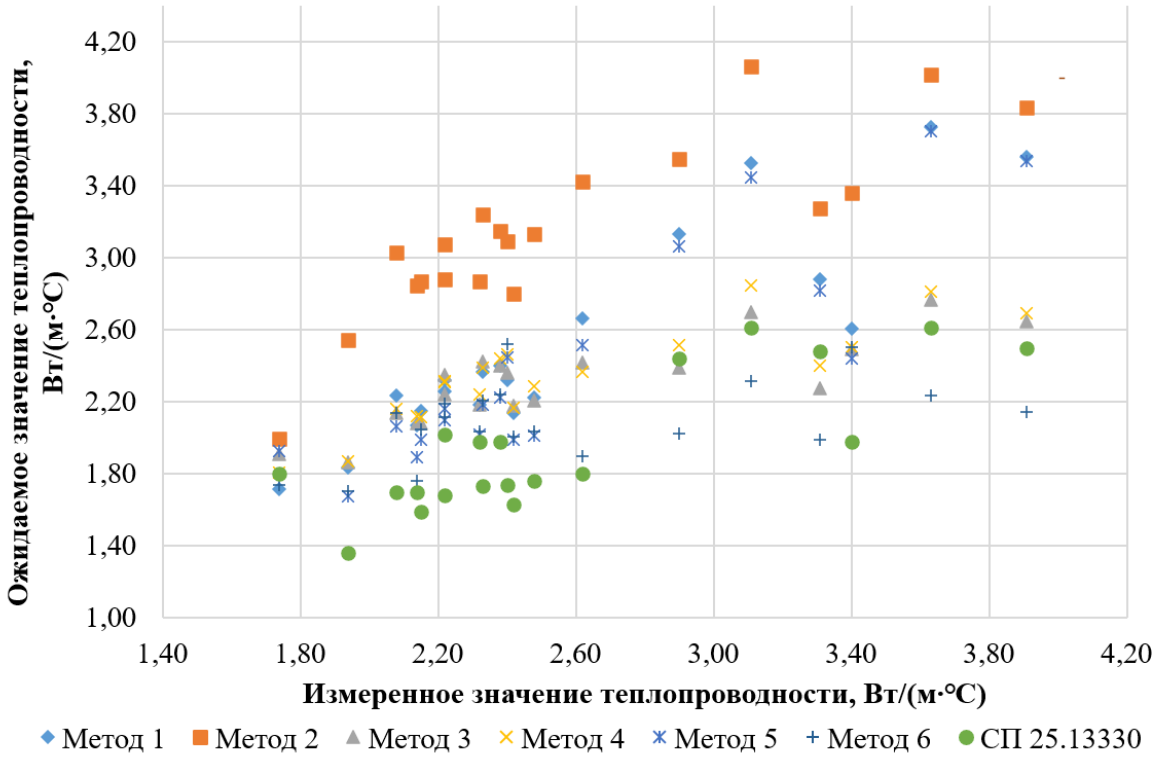


Рисунок 21 – Значения теплопроводности в модели Фаруки, в зависимости от способа учета теплопроводности частиц, а также согласно СП 25.13330 для грунтов в мерзлом состоянии

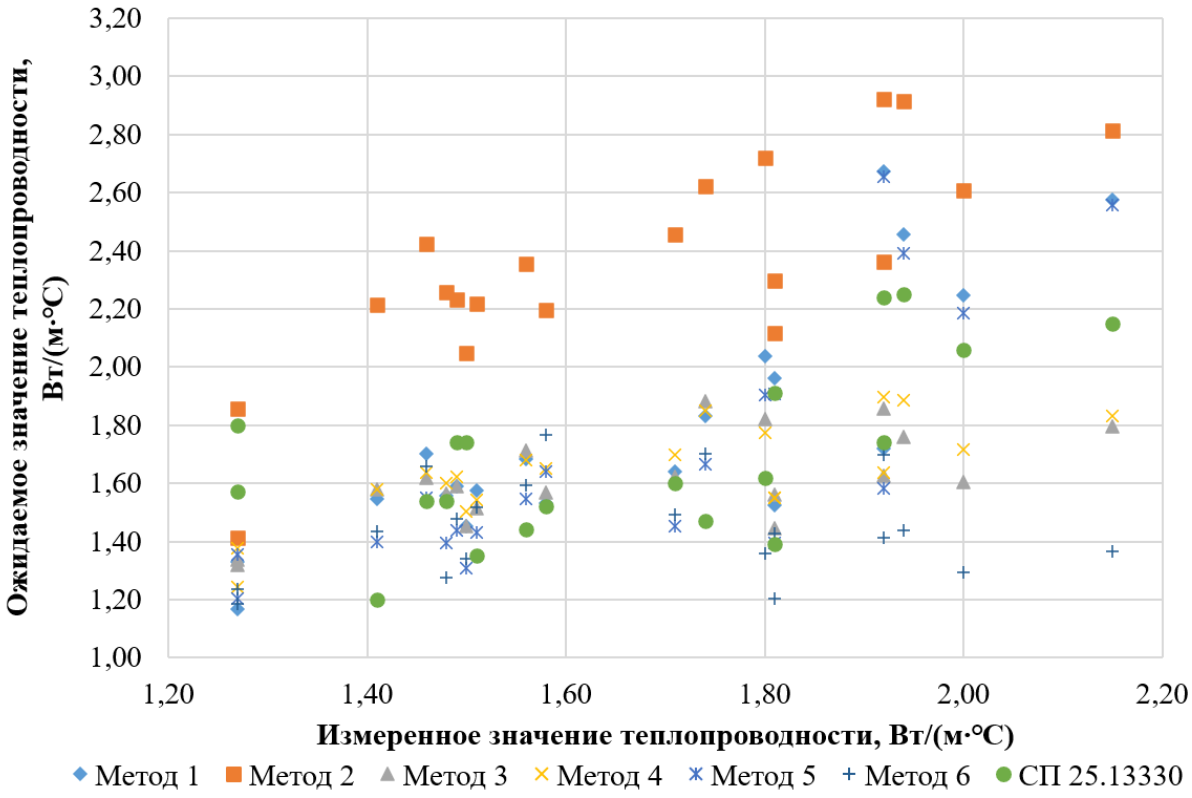


Рисунок 22 – Значения теплопроводности в модели Фаруки, в зависимости от способа учета теплопроводности частиц, а также согласно СП 25.13330 для грунтов в талом состоянии

Таблица 10 – Значения теплопроводности в модели Йохансена в зависимости от способа учета теплопроводности частиц

Метод / N обр.	Мерзлое состояние								Талое состояние							
	№1	**№2**	**№3**	**№4**	**№5**	**№6**	**СП**	**Эксперимент**	**№1**	**№2**	**№3**	**№4**	**№5**	**№6**	**СП**	**Эксперимент**
1	2,22	3,25	2,11	2,13	2,02	1,69	1,70	**2,08**	1,66	2,44	1,57	1,59	1,51	1,26	1,54	**1,46**
2	2,21	3,40	2,19	2,29	1,97	1,80	1,76	**2,48**	1,61	2,48	1,59	1,66	1,43	1,31	1,60	**1,71**
3	2,37	3,32	2,35	2,44	2,16	2,03	2,02	**2,22**	1,31	1,84	1,30	1,35	1,20	1,12	1,80	**1,27**
4	2,74	3,88	2,59	2,61	2,52	2,09	1,98	**3,40**	1,67	2,36	1,57	1,59	1,53	1,27	1,74	**1,92**
5	2,03	2,98	2,04	2,08	1,83	1,69	1,70	**2,14**	1,51	2,23	1,52	1,55	1,36	1,26	1,54	**1,48**
6	2,72	3,78	2,42	2,36	2,53	1,83	1,80	**2,62**	1,98	2,76	1,77	1,72	1,85	1,33	1,62	**1,80**
7	2,14	3,09	2,06	2,10	1,95	1,69	1,59	**2,15**	1,53	2,21	1,47	1,50	1,39	1,20	1,35	**1,51**
8	2,27	3,29	2,33	2,45	2,43	1,99	1,74	**2,40**	1,46	2,12	1,50	1,58	1,57	1,28	1,52	**1,58**
9	2,13	2,97	2,17	2,16	1,95	1,82	1,63	**2,42**	1,49	2,08	1,52	1,51	1,36	1,27	1,39	**1,81**
10	2,34	3,31	2,38	2,33	2,15	1,95	1,68	**2,22**	1,64	2,32	1,67	1,63	1,51	1,37	1,44	**1,56**
11	1,67	2,40	1,70	1,70	1,52	1,41	1,36	**1,94**	1,46	2,11	1,49	1,49	1,33	1,23	1,20	**1,41**
12	2,35	3,41	2,41	2,37	2,14	1,96	1,73	**2,33**	1,77	2,58	1,82	1,79	1,62	1,48	1,47	**1,74**
13	2,39	3,41	2,39	2,44	2,18	2,01	1,98	**2,38**	1,52	2,17	1,52	1,55	1,38	1,28	1,74	**1,49**
14	2,22	3,15	2,22	2,29	2,01	1,88	1,98	**2,32**	1,42	2,02	1,42	1,46	1,29	1,20	1,74	**1,50**
15	1,61	1,92	1,82	1,71	1,54	1,64	1,80	**1,74**	1,14	1,35	1,29	1,20	1,08	1,15	1,57	**1,27**
16	4,51	5,05	3,44	3,49	4,46	2,32	2,61	**3,63**	2,74	3,07	2,09	2,12	2,72	1,41	2,24	**1,92**
17	4,21	4,71	2,85	2,90	4,18	2,19	2,5	**3,91**	2,65	2,97	1,79	1,82	2,63	1,36	2,15	**2,15**
18	4,06	4,99	2,86	3,07	3,94	2,36	2,61	**3,11**	2,44	3,00	1,72	1,84	2,37	1,42	2,25	**1,94**
19	3,53	4,24	2,85	2,99	3,42	2,03	2,44	**2,90**	2,29	2,76	1,85	1,94	2,22	1,29	2,06	**2,00**
20	3,29	3,97	2,76	2,90	3,19	2,04	2,48	**3,31**	2,00	2,42	1,68	1,76	1,94	1,22	1,91	**1,81**

Таблица 11 – Значения теплопроводности в модели Фаруки в зависимости от способа учета теплопроводности частиц

Метод / N обр.	Мерзлое состояние								Талое состояние							
	№1	**№2**	**№3**	**№4**	**№5**	**№6**	**СП**	**Эксперимент**	**№1**	**№2**	**№3**	**№4**	**№5**	**№6**	**СП**	**Эксперимент**
1	2,23	3,03	2,14	2,16	2,06	2,14	1,70	**2,08**	1,70	2,42	1,62	1,64	1,55	1,66	1,54	**1,46**
2	2,22	3,13	2,20	2,29	2,01	2,04	1,76	**2,48**	1,64	2,46	1,62	1,70	1,45	1,49	1,60	**1,71**
3	2,25	2,88	2,24	2,31	2,10	2,11	2,02	**2,22**	1,33	1,86	1,32	1,38	1,20	1,23	1,80	**1,27**
4	2,61	3,36	2,49	2,51	2,44	2,51	1,98	**3,40**	1,72	2,36	1,63	1,64	1,58	1,70	1,74	**1,92**
5	2,07	2,84	2,08	2,12	1,89	1,76	1,70	**2,14**	1,56	2,26	1,56	1,60	1,39	1,28	1,54	**1,48**
6	2,66	3,42	2,42	2,36	2,51	1,90	1,80	**2,62**	2,04	2,72	1,82	1,77	1,91	1,36	1,62	**1,80**
7	2,15	2,87	2,08	2,11	1,99	2,05	1,59	**2,15**	1,57	2,22	1,51	1,54	1,43	1,52	1,35	**1,51**
8	2,32	3,09	2,36	2,46	2,45	2,52	1,74	**2,40**	1,53	2,20	1,57	1,65	1,64	1,77	1,52	**1,58**
9	2,14	2,80	2,17	2,16	1,99	2,01	1,63	**2,42**	1,53	2,12	1,56	1,55	1,39	1,43	1,39	**1,81**
10	2,32	3,07	2,35	2,31	2,16	2,19	1,68	**2,22**	1,69	2,35	1,71	1,68	1,55	1,59	1,44	**1,56**
11	1,83	2,54	1,87	1,87	1,67	1,70	1,36	**1,94**	1,55	2,21	1,58	1,58	1,40	1,43	1,20	**1,41**
12	2,37	3,24	2,43	2,39	2,18	2,20	1,73	**2,33**	1,83	2,62	1,88	1,85	1,67	1,70	1,47	**1,74**
13	2,40	3,15	2,40	2,44	2,22	2,24	1,98	**2,38**	1,59	2,23	1,59	1,62	1,44	1,48	1,74	**1,49**
14	2,18	2,87	2,18	2,24	2,02	2,03	1,98	**2,32**	1,45	2,05	1,45	1,50	1,31	1,34	1,74	**1,50**
15	1,72	1,99	1,91	1,80	1,93	1,74	1,80	**1,74**	1,17	1,41	1,34	1,24	1,36	1,19	1,57	**1,27**
16	3,72	4,02	2,77	2,81	3,70	2,24	2,61	**3,63**	2,67	2,92	1,86	1,90	2,65	1,41	2,24	**1,92**
17	3,56	3,83	2,65	2,69	3,54	2,14	2,5	**3,91**	2,58	2,81	1,80	1,83	2,56	1,37	2,15	**2,15**
18	3,52	4,06	2,70	2,85	3,45	2,31	2,61	**3,11**	2,46	2,91	1,76	1,89	2,39	1,44	2,25	**1,94**
19	3,13	3,55	2,39	2,52	3,06	2,02	2,44	**2,90**	2,25	2,61	1,61	1,72	2,19	1,29	2,06	**2,00**
20	2,88	3,27	2,27	2,40	2,82	1,99	2,48	**3,31**	1,96	2,30	1,45	1,55	1,91	1,20	1,91	**1,81**

В результате анализа, можно сделать следующие выводы:

1. Теплопроводность частиц в рассматриваемых моделях оказывает значительное влияние на получаемые значения теплопроводности грунтов в мерзлом и талом состоянии.

2. По наилучшим способам учета теплопроводности частиц (методы 3,4) Модель Йохансена и Фаруки демонстрируют примерно схожую эффективность, находящуюся на удовлетворительном уровне, и превосходят по точности метод, отраженный в СП 25.13330.

3. Наилучшее соответствие экспериментальным данным в мерзлом и талом состоянии показывает модель Йохансена при способе учета теплопроводности частиц №4.

4. Методы учета теплопроводности частиц №2,6 показывают наихудшие результаты – №2 сильно завышает значения теплопроводности, а №6 – занижает.

5. Использование табличных значений СП 25.13330 может давать значительную погрешность в определении теплопроводности в мерзлом и талом состоянии (по сравнению с рассматриваемыми моделями).

В целом, конечно, используемая выборка грунтов является достаточно небольшой для полноценного вывода о эффективности рассматриваемых моделей. На статистические данные эффективности моделей значительное влияние оказали несколько образцов (№4,15,17) имеющие значительно отличные значения теплопроводности от ожидаемых. Однако можно сделать вывод, что данные модели демонстрируют лучшую сходимость чем табличные значения СП 25.13330. Использование в моделях ряда физических свойств конкретного образца грунта – степени водонасыщения, плотности скелета, содержания незамерзшей воды, общей влажности и льдистости, пористости, гранулометрического или минералогического состава, имеет явные преимущества.

3.4 Выводы

Теплофизические свойства грунтов, являются ключевыми исходными параметрами для моделирования, играют важную роль в обеспечении его точности и достоверности получаемых результатов. Особую актуальность представляет вопрос оценки теплопроводности мерзлых грунтов.

Теплопроводность дисперсных грунтов может быть оценена при помощи математических моделей, которые разделяются на две большие группы – теоретические и эмпирические. Ключевыми входными параметрами моделей являются: минералогический состав, комплекс физических свойств и теплопроводность компонентов грунта.

Рассмотренные модели Йохансена (эмпирическая модель) и Фаруки (теоретическая модель) демонстрируют лучшую эффективность по сравнению с принятым в практике методом, отраженным в СП 25.13330, однако в целом находящуюся на удовлетворительном уровне, что

обусловлено сложностью описания теплофизических свойств мерзлых грунтов универсальными зависимостями из-за высокой неоднородности состава, текстуры, структуры и условий формирования. Несмотря на имеющиеся недостатки и ограничения, актуальность дальнейшего рассмотрения данных моделей обусловлена их преимуществами, которые заключаются в использовании широкого набора свойств грунтов.

Таким образом, в данной главе обосновано второе защищаемое положение. **Теплопроводность дисперсных грунтов может быть оценена с помощью математических моделей, ключевыми входными параметрами которых являются: минералогический состав, теплопроводность компонентов грунта и комплекс физических свойств. Применение данных моделей обеспечивает более высокую точность по сравнению с традиционным методом, основанным на использовании плотности скелета грунта и влажности.**

Изучение применимости моделей оценки теплопроводности мерзлых грунтов является весьма актуальной задачей будущих исследований. Необходимо расширять количество сравниваемых моделей, увеличивать экспериментальную выборку грунтов (включая заторфованные и засоленные грунты).

Важным аспектом настоящей работы является обоснование необходимости экспериментального определения минералогического состава дисперсных мерзлых грунтов для верной оценки теплопроводности частиц грунта, что должно позволить значительно повысить точность моделей. Анализ результатов показал, что наилучшим способом определения теплопроводности частиц является подход, предложенный Йохансеном. В данном подходе теплопроводность частиц грунта оценивается по содержанию кварца, которое, в свою очередь, принимается равным половине суммы песчаной и пылеватой фракций.

ГЛАВА 4. НЕЗАМЕРЗШАЯ ВОДА В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Одной из возникающих проблем при оценке теплопроводности дисперсных мерзлых грунтов является учет количества незамерзшей воды в грунте. Процесс замерзания воды в порах грунтов очень сложен и как отмечает Г.Г. Болдырев в настоящее время не существует достаточного точного понимания данного процесса [9].

Фазовый состав мерзлых грунтов всегда соответствует внешним условиям. В 1945 г. Н.А. Цытович сформулировал фундаментальный принцип механики мерзлых грунтов – принцип равновесного состояния воды и льда в мерзлых грунтах. Согласно этому принципу «количество, состав и свойства жидкой фазы воды, находящейся в мерзлом грунте, не остаются постоянными, а изменяются в зависимости от параметров состояния системы, находясь с ними в динамическом равновесии» [111]. Это явление играет ключевую роль в понимании механических и других свойств мерзлых грунтов, способствуя изменению их прочности и деформационных свойств.

Поровую воду в грунтах условно принято делить на свободную и связанную. Содержание связанной воды в грунтах обусловлено влиянием активной поверхности частиц грунта на поровую воду, в результате этого взаимодействия образуется водная пленка вокруг минеральных частиц. Связанная вода разделяется на прочносвязанную (несколько молекулярных слоев, непосредственно обволакивающих минеральные частицы) и рыхлосвязанную (более удаленные от частицы слои водной пленки) [54;111]. Чем больше удельная поверхность частиц грунта, тем активнее они взаимодействуют с водой, что обусловлено большим потенциалом свободной поверхностной энергии и тем ниже температура замерзания. С увеличением дисперсности удельная поверхность возрастает и достигает наибольшего значения у глин.

Н.А. Цытович выделял три характерные области графика содержания незамерзшей воды от температуры [111]:

Первая область – интенсивных фазовых превращений, где вымерзает свободная вода, а также часть рыхлосвязанной воды. В данной области изменение весового количества незамерзшей воды на 1°С составляет более 1%. Для песков нижняя граница данной области находится вблизи точки начала замерзания – около –0,5°С, для супесей в диапазоне от –3 до –5°С, а для суглинков и глин сдвигается в сторону еще более отрицательных температур. Область фазовых превращений значительно расширяется для засоленных грунтов.

Вторая область – переходная, где изменение содержания незамерзшей воды на 1°С менее 1%, но более 0,1%. В этой температурной области вымерзает большая часть рыхлосвязанной воды.

В третьей области практически вся вода кристаллизуется в лед. Фазовые превращения воды на 1°С не превышают 0,1%. Расположение третьей области, в которой вымерзает прочносвязанная вода, сильно зависит от состава грунтов. Так, например, для незаселенных

песков и супесей она располагается при температурах около –5°С, а для суглинков и глин область практически замерзшего состояния находится при очень низких температурах – около –20°С. Для засоленных грунтов данная область может быть и значительно ниже –20°С (в зависимости от типа засоления).

На основании современных экспериментальных данных температурных зоны выделяются следующим образом:

- интервал от 0 до –2,0°С – замерзание свободной воды и наиболее удаленных слоев рыхлосвязанной воды;
- интервал от –2 до –5°С – замерзание основной части рыхлосвязанной воды;
- интервал от –5 до –12°С – замерзание части прочносвязанной воды.

При температурах –30 °С и ниже содержание незамерзшей воды в грунтах приближается к количеству прочносвязанной воды. Температура замерзания большей части прочносвязанной воды снижается до –78 °С, тогда как адсорбционный монослой на поверхности минеральных частиц сохраняет жидкое состояние вплоть до –180 °С. Именно поэтому в мерзлых дисперсных грунтах всегда присутствует определенное количество незамерзшей воды, причем ее содержание возрастает с повышением температуры в интервале фазового перехода.

Определяющем диапазоном температур, который наиболее влияет на содержание незамерзшей воды является от 0 до –3°С [54; 94; 111].

Для каждого образца грунта характерна своя уникальная кривая содержания незамерзшей воды от температуры [53; 54; 94]. Графики зависимости содержания незамерзшей воды от температуры для различных типов грунтов имеют сходный асимптотический характер, однако существенно различаются по абсолютным значениям (Рисунок 23). В песчаных грунтах (за исключением пылеватых) содержание незамерзшей воды незначительно и составляет единицы или доли процента, причем даже при существенно отрицательных температурах оно асимптотически стремится к предельному значению, не достигая нуля. В глинистых грунтах количество незамерзшей воды при тех же температурах может достигать нескольких десятков процентов. Так, например, в юрских глинах при температуре –50°С ее содержание равно примерно 15 % от массы сухого грунта [94].

Значительно влияние на фазовый состав влаги мерзлых грунтов влияет наличие в поровом растворе легкорастворимых солей – увеличение засоленности повышает количество незамерзшей воды, при этом не замерзает как связанная вода, так и часть свободной воды.

Содержание незамерзшей воды существенно зависит от химического состава растворенных солей в поровой воде, увеличиваясь в ряду: сульфаты, карбонаты, нитраты, хлориды [54]. Например, морские донные отложения, водонасыщенные морской хлоридной водой с минерализацией 35 ‰, остаются полностью талыми вплоть до температуры –1,9 °С [3].

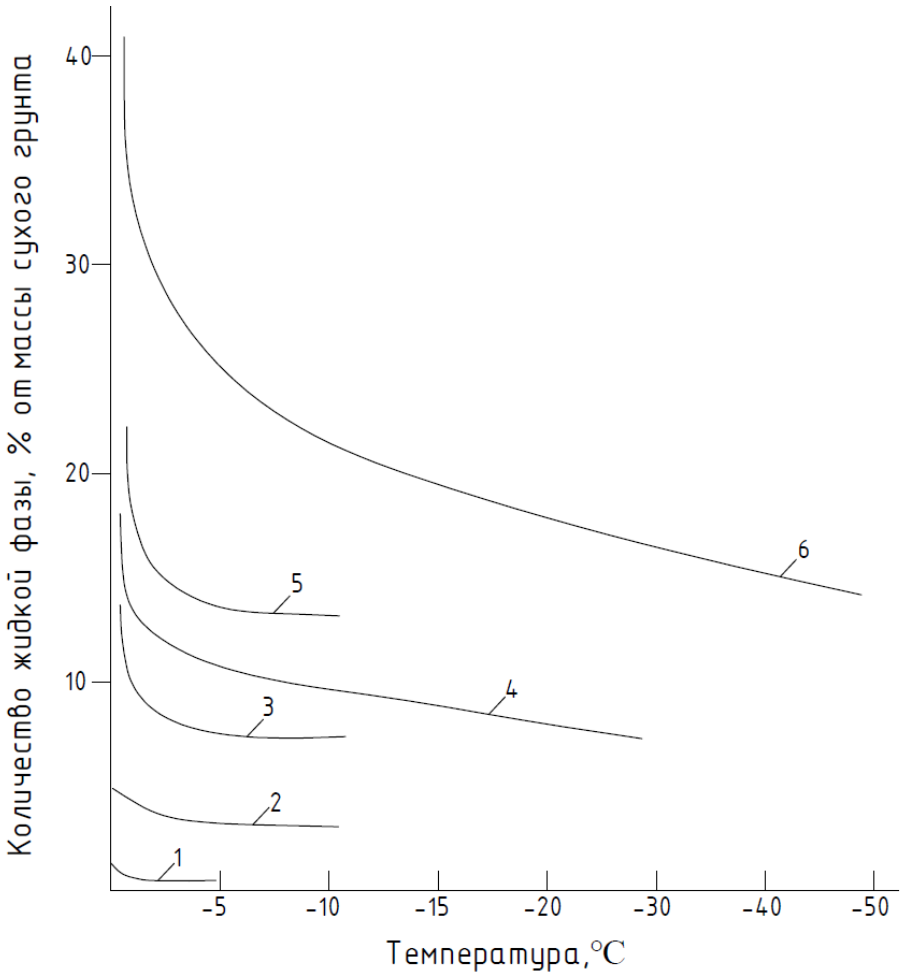


Рисунок 23 – Зависимость содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах от температуры [94]: 1,2 – песок кварцевый и пылеватый; 3 – супесь тяжелая; 4 – суглинок покровный, тяжелый; 5,6 – глина пылеватая и юрская.

Помимо температуры и степени засоленности на фазовый состав мерзлых грунтов влияет давление. Так увеличение давления на 0,1 МПа понижает температуру замерзания воды на 0,007 °С, что приводит к увеличению количества незамерзшей воды в грунтах [111]. В мерзлых грунтах при изменении температуры одновременно меняется и давление: «образование льда из-за увеличения его объема по сравнению с водой приводит к возрастанию давления, в то время как таяние льда и, соответственно, уменьшение объема приводит к снижению давления» [3].

4.1 Способы оценки содержания незамерзшей воды

На данный момент существуют множество методов лабораторного определения содержания незамерзшей воды [9]:

- дилатометрический метод;
- калометрический метод;
- контактный метод;
- криоскопический метод;
- метод кинетики кристаллизации;

- метод потенциала влаги;
- метод ядерного магнитного резонанса;
- метод импульсной рефлектометрии и др.

Ввиду того, что лабораторные методы определения количества незамерзшей воды в мерзлых грунтах, а также оборудование, необходимое для их использования, отличаются высокой сложностью, трудоемкостью и стоимостью, многие исследователи прибегают к использованию различных допущений. Эти допущения позволяют прогнозировать содержание незамерзшей воды с достаточной для практики точностью.

Первый расчетный метод определения содержания незамерзшей воды в отечественной практике был предложен А.Н. Давыдочкиным в 1957 г. [9]. Согласно этому методу, количество незамерзшей воды принимается равным максимальной молекулярной влагоемкости или близкой к ней характеристике – влажности на границе раскатывания (W_P). В дальнейшем методика была модифицирована: в расчет введен учет степени засоленности грунта. В настоящий момент данный подход отражен в СП 25.13330.2020 в следующем виде:

$$W_w = k_w W_P + \mu D_{sal}, \quad (4.1)$$

k_w – коэффициент, принимаемый в зависимости от вида грунта, числа пластичности и температуры грунта; W_P – влажность грунта на границе пластичности (раскатывания), д.е.; μ – коэффициент, принимаемый в зависимости от вида грунта, числа пластичности и температуры грунта (для незасоленных равен нулю); D_{sal}– степень засоленности грунта, д.е.

В работе Кудрявцева С.А., Сахарова И.И. и Парамонова В.Н., приведена аппроксимирующая функция, описывающая коэффициент K_w [55]:

$$K_w = \frac{a + b \cdot T}{1 + c \cdot T + d \cdot T^2}, \quad (4.2)$$

где T – температура грунта; a, b, c, d – эмпирические коэффициенты, значения которых приведены в Таблице 12.

Таблица 12 – Значения коэффициентов a, b, c, d

Наименование грунта	Число пластичности Ip	a	b	c	d
Супесь	2–7	1,9664	–5,1234	–15,9436	0,54781
Суглинок легкий	8–13	0,7862	–0,2963	–0,8451	–0,0011
Суглинок тяжелый	14–17	1,0845	–0,9631	–2,1640	0,01145
Глина	>17	1,2088	–0,2914	–0,8141	–0,01762

Содержание незамерзшей воды можно вычислить по следующим зависимостям, учитывающим полную влагоемкость грунта [9]:

$$W_w = 4,5 / W_п \sqrt{T_{bfw} / T_{bf}}\,, \tag{4.3}$$

$$W_w = 4,5 S_r / \sqrt{T(0,8 S_r + 0,2)}\,, \tag{4.4}$$

где S_r – степень влажности, равная $W_{tot}/W_п$; $W_п$ – полная влагоемкость; W_{tot} – начальная суммарная влажность; T_{bfw} – температура начала замерзания при влажности равной полной влагоемкости; T – отрицательная температура; T_{bf} – температура начала замерзания при начальной суммарной влажности.

Связь содержания незамерзшей воды с удельной поверхностью частиц продемонстрировал в работе D. Anderson [124]. Данный метод основан на предположении, что при условии нахождения грунта при температуре ниже температуры начала его замерзания, весовое содержание незамерзшей воды может быть представлено степенной кривой, включающей в себя два параметра α и β:

$$W_w = \alpha |T|^{\beta}, \tag{4.5}$$

где α и β – эмпирические параметры, зависящие от удельной поверхности частиц основных минералов, определяемые по Таблице 13; T – температура грунта.

Таблица 13 – Удельная поверхность минералов и эмпирические коэффициенты в методе Тайса и Андерсона

Грунт	**Удельная поверхность ($м^2$/г)**	**α**	**β**
Базальт	6	0,0345	1,13
Окислы железа	10	0,1105	0,8
Гравий (Западный Ливан)	18	0,0382	0,64
Лимонит	26	0,0882	0,83
Ил (Фэрбанкс, Аляска)	40	0,0481	0,33
Глина (месторождение Доу Фил)	50	0,1035	0,61
Каолинит	84	0,238	0,36
Глина (Саффилд)	140	0,1392	0,31
Глина (Гаваи)	382	0,3242	0,24
Бентонит (Вайоминг)	800	0,5599	0,29
Бентонит (Умиат, Аляска)	800	0,6755	0,34

В работе J. Côté [136] предложен более широко применимый метод оценки содержания незамерзшей воды, учитывающий площадь поверхности минералов следующим образом:

$$\ln W_w = \ln \rho_d - 11,25 + 0,5519 \ln S_A - 1,449 \ln(-T) S_A^{-0,264}, \tag{4.6}$$

где T – отрицательная температура, °C; ρ_d – плотность скелета грунта, г/см^3; S_A – показатель площади поверхности минералов, рассчитываемый по формуле [198]:

$$S_A = 3,89 d_g^{-0,905}, \quad (4.7)$$

$$d_g = \exp(-0,069078 f_{sand} - 0,036497 f_{silt} - 0,0247 f_{clay}), \quad (4.8)$$

где f_{sand} – содержание песчаных частиц, f_{silt} – содержание пылеватых частиц, f_{clay} – содержание глинистых частиц.

Fukuda [151] предложил оценивать содержание незамерзшей воды может при помощи простой эмпирической зависимости:

$$W_w = 21,18 e^{0,608T}, \quad (4.9)$$

где, T – отрицательная температура, °C

S. Knutsson [166] предложил оценивать содержание незамерзшей воды используя влажность на границе текучести (Рисунок 24).

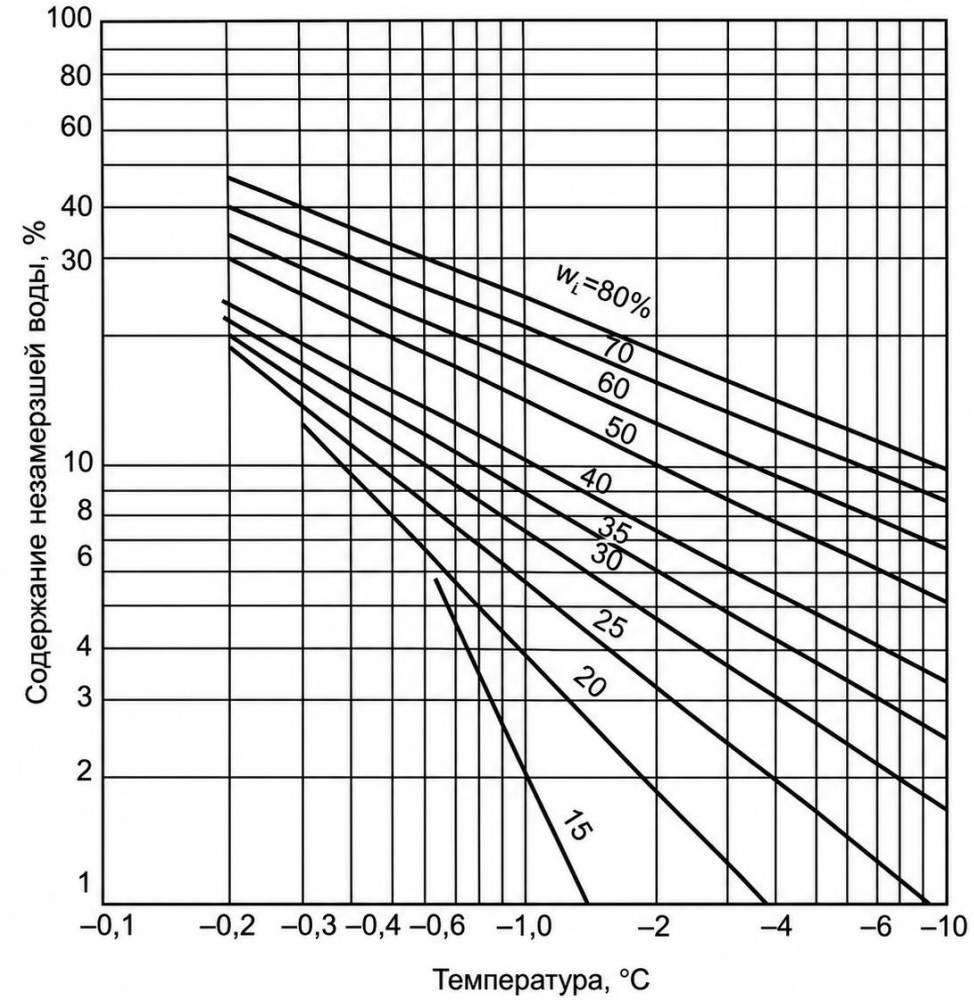


Рисунок 24 – Зависимость содержания незамерзшей воды от температуры и влажности на границе текучести [166]

Григорьев Б.В. [30] для аппроксимации экспериментальных данных предлагает использовать зависимость, эмпирические коэффициенты которой должны определяться для конкретного типа грунта:

$$W_w = W_{ост} + b_1 X + b_2 X^n, \tag{4.10}$$

где b_1, b_2, n – эмпирические коэффициенты для разновидностей грунтов, определяются по Таблице 14; параметр X вычисляется по формуле:

$$X = \frac{T - T_{ост}}{273 - T_{ост}}. \tag{4.11}$$

Таблица 14 – Эмпирические коэффициенты в методе Григорьева

Коэффициент	Глина	Суглинок	Песок	Торф
b_1	1,6	3,7	0,5	25,0
b_2	20,4	24,8	21,6	189,5
n	16,1	13,5	26,5	18,9

Kong L. отмечает зависимость функции содержания незамерзшей воды с числом пластичности грунта [167]:

$$W_w = W_0 \left(\frac{T}{T_{bf}} \right)^b, \tag{4.12}$$

где W_0 – начальная влажность грунта, %; T – отрицательная температура, °C; T_{bf} – температура замерзания, определяемая по формуле (4.18); b – эмпирический коэффициент, определяемый по формуле:

$$b = 0,30 \ln I_p - 2,232, \tag{4.13}$$

где I_P – число пластичности, д.е.

Таким образом можно выделить три общих подхода при оценке содержания незамерзшей воды в дисперсных грунтах:

1. Эмпирические методы на основе экспериментально полученных корреляционных зависимостей.
2. Методы, учитывающие физические характеристики грунтов.
3. Методы, учитывающие минеральный состав грунтов.

Отдельного внимания заслуживает рассмотрение активно развивающегося за рубежом метода использования характеристической кривой влажности для оценки содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах. Актуальность рассмотрения этой темы обусловлена практически полным отсутствием описания данной методики в отечественной литературе. Ввиду обширности данной темы, она будет рассмотрена отдельно далее.

4.2 Температура начала замерзания грунта

Как отмечалось выше, процесс замерзания поровой воды в грунтах обладает рядом особенностей, обусловленных взаимодействием воды с поверхностью минеральных частиц и присутствием растворенных солей. При лабораторном определении температуры замерзания грунта регистрируется зависимость температуры от времени, типичный график которой представлен на Рисунке 25 [80]. На данном графике выделяется несколько характерных участков, каждый из которых соответствует определенному этапу фазового перехода.

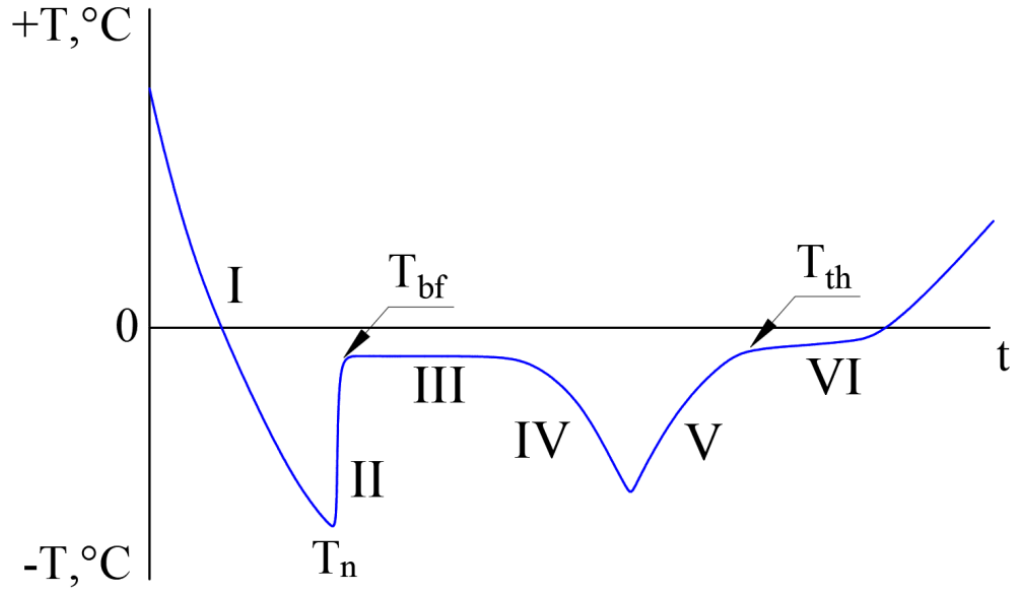


Рисунок 25 – Схема изменения температуры грунта в процессе охлаждения, замерзания и оттаивания [80]

При помещении грунта в среду с отрицательной температурой, вначале наблюдается охлаждение и переохлаждение грунта (участок I), которое происходит без льдовыделения до определенной температуры переохлаждения T_n. При этой температуре в поровой воде образуются первые центры кристаллизации льда.

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

После температурного скачка наступает период с условно устойчивой постоянной температурой, в течение которого происходит кристаллизация свободной воды в грунте (участок III). Эта температура называется температурой начала замерзания грунта T_{bf} под которой понимают устойчивую температуру кристаллизации поровой воды, что сопровождается увеличением объема грунта, льдовыделением, смерзаемостью и др.

При дальнейшем замораживании грунта его температура понижается (участок IV), происходит замерзание рыхлосвязанной влаги, выделение скрытой теплоты льдообразования постепенно уменьшается. Когда в грунте остается лишь прочносвязанная вода, наблюдается более быстрое понижение температуры.

При повышении наружной температуры наблюдается нелинейность температурного кривой, что обусловлено поглощением скрытой теплоты (участок V). Температура таяния – T_{th} несколько выше температуры замерзания, однако она обычно приравнивается к ней (участок VI).

Как было отмечено ранее, температуры замерзания и оттаивания могут различаться (у глинистых грунтов температура оттаивания на десятые доли градуса выше температуры замерзания), что может быть связано с проявлением капиллярных эффектов при замораживании [94]. «Однако при многократном циклическом промерзании–оттаивании эти значения практически совпадают, вероятно, вследствие структурно-текстурных преобразований в грунтах» [114]. По этой причине в практике обычно используется единый термин – «температура замерзания», подразумевая, что она численно близка к температуре оттаивания [114; 190].

Согласно НТД, в ряде случаев допускается применение расчетных методов для определения температуры начала замерзания грунтов [96; 97]. Однако для засоленных и заторфованных грунтов приоритет отдается экспериментальным методам, обеспечивающим наибольшую достоверность результатов.

Существенное влияние на температуру начала замерзания оказывает минерализация порового раствора. С возрастанием степени засоления грунта температура фазового перехода поровой воды в лед может существенно снижаться относительно 0 °С, достигая в отдельных случаях отрицательных значений порядка –2°С и ниже [53].

Степень засоленности грунта при расчете температуры замерзания возможно учесть согласно формуле, приведенной в СП 25.13330.2020:

$$T_{bf} = A - B(53C_{ps} + 40C_{ps}^{\ 2}), \tag{4.14}$$

где A – коэффициент, характеризующий температуру начала замерзания незасоленного грунта; B – коэффициент, зависящий от типа засоления грунта; B=0 для незасоленных грунтов, B=1 для морского типа засоления, B=0,85 для континентального типа засоления; C_{ps} – степень минерализации грунтов влаги, определяемая по формуле:

$$C_{ps} = D_{sal} / (D_{sal} + 100W), \tag{4.15}$$

где D_{sal} – степень засоленности грунта, %; W – влажность засоленного грунта, д.е., принимаемая для грунтов с льдистостью $i_{tot} \leq 0{,}4$ равной общей влажности W_{tot}, а с $i_{tot} > 0{,}4$ равной влажности грунта между ледяными включениями W_m.

Температура начала замерзания грунта также существенно зависит от его гранулометрического состава: рост содержания глинистых частиц увеличивает долю связанной воды, термодинамические свойства которой отличаются от свободной, что вызывает смещение фазового перехода в область более низких температур. Учет этого фактора отражен в вышеуказанной формуле (4.14), в которой коэффициент A зависит от классификации грунтов:

для песков (кроме пылеватых): –0,1°С; супесей и пылеватых песков: –0,15°С; суглинков: –0,20°С; глин: –0,25°С.

Важным фактором, влияющим на температуру замерзания грунтов, является их общая влажность на момент начала промерзания. Еще Н.А. Цытович отмечал, что у глинистых грунтов с влажностью, близкой к текучей консистенции, температура замерзания приближается к 0°С, тогда как при твердой консистенции она может снижаться до –5°С [111]. Этот вывод подтверждается и современными исследованиями [2; 47; 114; 170; 190].

На Рисунке 26 показаны результаты работы В. С. Колунина и З. А. Ишковой, которыми была выявлена закономерность изменения температуры замерзания каолиновой глины в зависимости от ее влажности [47].

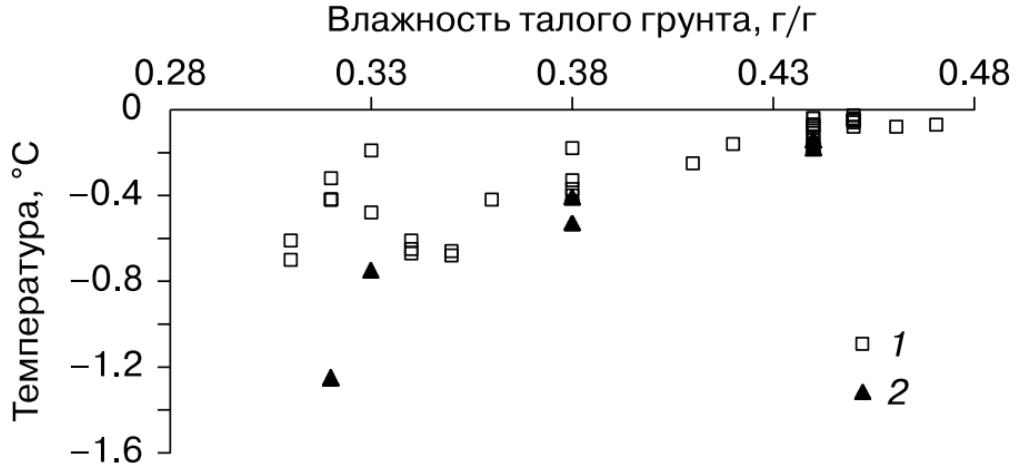


Рисунок 26 – Зависимость температуры начала замерзания каолиновой глины, измеренной методом «начала кристализации» воды (1) и методом «переохлаждения» (2) от влажности [47]

В зарубежной литературе описаны способы, позволяющие учитывать начальное содержание влаги и физические свойства грунтов при расчете температуры замерзания. Данные методы были описаны автором в работе [67].

В методе предложенным Федоровым [146] температура замерзания определяется исходя из влажности на границе текучести и естественной влажности грунта:

$$T_{bf} = -0,045\left(\frac{W}{W_L}\right)^{-4}, \tag{4.16}$$

где W_L – влажность на границе текучести, %; W – влажность грунта, %.

T. Kozlowski [169] предложил оценивать температуру замерзания, используя влажность на границе раскатывания и природную влажность:

$$T_{bf} = -0,729 W_P^{2,462} W^{-2}, \tag{4.17}$$

где W_P – влажность на границе раскатывания, %; W – влажность грунта, %.

Теоретический предел использования данной формулы ограничивается влажностью грунтов, которая должна удовлетворять требованию $W>0,5W_P$. Автором показана лучшая сходимость результатов при низких значениях влажности по сравнению с формулой Федорова.

L. Kong предложил использовать для определения температуры замерзания грунта число пластичности [167]:

$$T_{bf} = -0,015I_p - 0,063, \quad (4.18)$$

где Ip – число пластичности д.е.

Таким образом, существующий способ определения температуры замерзания грунта, отраженный в СП 25.13330 (формулы 4.14, 4.15), имеет определенные ограничения. С одной стороны, метод учитывает лишь основной классификационный признак грунта, что недостаточно для точной оценки температуры замерзания. С другой стороны, он позволяет учесть важнейший фактор засоленности грунтов.

Помимо выше указанных факторов на температуру начала замерзания грунта оказывают влияние: минеральный состав грунта (от которого зависит количество связанной воды, вследствие разной удельной поверхности минеральных частиц), давление, геометрическая характеристика порового пространства, скорость промерзания и другие параметры.

4.3 Характеристическая кривая влажности

С середины XX века за рубежом активно развивалось направление механики неводонасыщенных грунтов, основанное на использовании характеристической кривой влажности грунта (Soil-Water Characteristic Curve, SWCC). Характеристическая кривая влажности – это графическое представление взаимосвязи между всасыванием (давлением всасывания) или водным энергетическим потенциалом и содержанием воды (объемным или весовым). Энергетический потенциал поровой воды представляет собой величину энергии, необходимую для перемещения бесконечно малого количества воды из грунта в эталонный резервуар со свободной водой [149]. Эта энергия рассчитывается на единицу массы, объема или веса воды.

Развитие представлений о характеристической кривой влажности грунта тесно связано с формированием теории фильтрации и механики ненасыщенных грунтов. Одним из основоположников данного направления считается Л. А. Ричардс (Richards L.A.) который разработал теоретические основы описания движения влаги в ненасыщенных пористых средах [191]. Его исследования заложили фундамент для количественного анализа взаимосвязи между влажностью и энергетическим состоянием поровой воды.

Дальнейшее развитие теории SWCC связано с работами Брукса и Кори (Brooks R.H., Corey A.T.) предложивших одну из первых аналитических моделей для описания зависимости между

влажностью и всасыванием, а также с исследованиями ван Генухтена (van Genuchten M. T.), разработавшего эмпирические зависимости, которые получили широкое распространение благодаря высокой точности аппроксимации экспериментальных данных [133; 206]. Отдельно стоит отметить существенный вклад в развитие представлений о характеристической кривой Д. Фредлунда (Fredlund D. G.), которым была разработана универсальная математическая модель, описывающая SWCC [149;150]. Данные исследования стали основой для решения широкого круга задач гидрогеологии, почвоведения и геотехники.

Исследования показали ключевую роль SWCC в определении гидромеханического поведения ненасыщенных грунтов и способствовали становлению механики ненасыщенных грунтов как самостоятельного научного направления. В настоящее время зарубежом SWCC рассматривается как одна из фундаментальных характеристик ненасыщенных грунтов, необходимая для оценки его прочностных, деформационных и фильтрационных свойств. В данных работах было показано, что именно соотношение водной и газообразной фаз определяет поведение грунта при взаимодействии с инженерными сооружениями.

В поровом пространстве водонасыщенного грунта так или иначе присутствуют растворенные пузырьки воздуха, при высыхании и удалении воды из пор, энергия оставшейся поровой воды уменьшается, в результате чего увеличивается всасывание. Всасывание или давление всасывания грунта (ψ) в ненасыщенных грунтах определяется как разница давлений между газообразной и водной фазами в порах (т. е. $\psi = p_a - p_w$) на границе их раздела.

При достижении определенного уровня всасывания газообразная фаза начинает активно проникать в крупные поры. Этот уровень называется значением входа воздуха (AEV) или начальным давлением всасывания. В процессе высыхания грунта все больше воды заменяется воздухом, способность грунта к всасыванию продолжает расти. При определенном значении всасывания большая часть поровой воды заменяется воздухом, оставшееся небольшое количество воды адсорбируется на поверхности частиц грунта в виде тонких пленок и находится в наиболее мелких порах. Это количество воды находится в стабильном состоянии и называется остаточным содержанием воды. Адсорбционные силы, действующие на поверхности частиц, увеличиваются с расстоянием, а капиллярные силы становятся слабее. Поэтому для удаления следующего слоя поровой воды требуется больше энергии [200].

Исходя из вышесказанного, кривую SWCC принято разделять на три различные зоны, которые отображены на Рисунке 27: зону граничного эффекта (ограничивается значением входа воздуха AEV), переходную или транзитную зону (ограничивается остаточным содержанием воды) и остаточную зону ненасыщенности. Термодинамические расчеты зарубежных авторов, показывают, что теоретическое значение всасывания, соответствующее нулевому содержанию воды, составляет примерно 10^6 кПа [149].

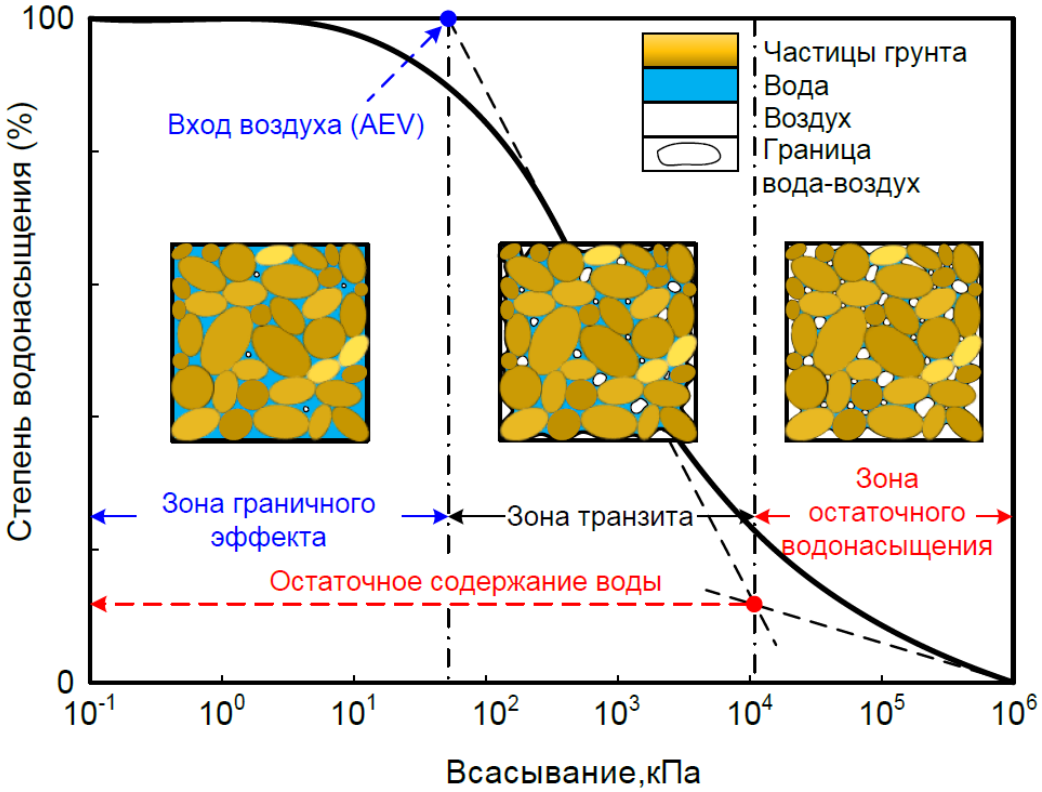


Рисунок 27 – Схематичное представление характеристической кривой влажности

Всасывание грунта разделяется на: структурное, осмотическое и полное. Полное (общее) всасывание (ψ_t) – это сумма структурного (ψ_m) и осмотического всасывания(ψ_o):

$$\psi_t = \psi_m + \psi_o . \tag{4.19}$$

Структурное всасывание определяется как разница между поровым давлением газа (P_a) и поровым давлением воды (P_w):

$$\psi_m = P_a - P_w . \tag{4.20}$$

Осмотическое всасывание – это давление растворенных веществ в поровой воде характерное для засоленных грунтов. Оно влияет на миграцию воды из области с более низкой концентрацией растворенного вещества в область с более высокой концентрацией растворенного вещества. В связи со сложностью определения осмотического всасывания при решении практических задач принято приравнивать структурное всасывание равным полному.

SWCC служит важным инструментом для прогнозирования механического поведения ненасыщенных грунтов и позволяет решать практические задачи. В исследованиях показана взаимосвязь SWCC с механическими, гидравлическими и теплофизическими свойствами грунтов, что дает возможность моделирования поведения ненасыщенных грунтов на основе зависимости всасывания от влажности [150; 207].

Определение давления всасывания грунта является нетривиальной задачей, для решения которой на сегодняшний день существует множество прямых и косвенных методик лабораторных исследований. В настоящий момент в нашей стране практически полностью

отсутствуют исследования, посвященные данной теме. Первые работы были опубликованы М.А. Новгородовой и автором настоящей работы [65; 66; 67; 72]. Не существует методик и регламентов проведения лабораторных испытаний, применения методики для прогнозирования функционирования сооружений. Вместе с тем, мировой опыт показывает эффективность использования данного подхода, что делает изучение темы особо актуальной.

Направление механики неводонасыщенных грунтов заслуживает отдельного подробного рассмотрения и выходит за рамки настоящей работы. Однако как показывают последние исследования в этой области, характеристическую кривую влажности можно использовать для оценки содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах.

В зарубежной литературе график взаимосвязи между содержанием незамерзшей воды и температурой обычно обозначается аббревиатурой SFCC (Soil Freezing Characteristic Curve – характеристическая кривая замерзания грунта). Также встречаются следующие названия:

- кривая фазового состава (PCC) [124; 175];
- характеристическая кривая незамерзшей воды (UWCC) [180];
- уравнение температуры замерзания или уравнение равновесия [170];
- кривая замерзания грунта (SFC) [153];
- кривая удержания воды при замерзании (SFRC) [178].

Рядом зарубежных авторов показано, что SFCC играет важную роль в оценке свойств мерзлых грунтов. К таким свойствам относятся гидравлическая проводимость [126], сегрегационный потенциал пучения [168], модуль упругости [129] и прочностные свойства [120; 122]. Особую роль использование SFCC играет в моделировании механизма массопереноса воды, тепла и растворенных веществ в мерзлых грунтах [200; 216; 220].

В процессе дегидратации дисперсных грунтов, вода постепенно удаляется и заменяется воздухом, матричный потенциал оставшейся воды уменьшается. При переходе воды в лед происходит схожий процесс результатом которого также является уменьшения количества жидкой воды.

Матричный потенциал формируется под действием двух основных механизмов: адсорбционной силы и капиллярной силы [132]. Адсорбционная сила проявляется на границе раздела твердой и жидкой фаз. Вода удерживается на поверхности частиц грунта в виде тонких пленок, создавая прочную связь между ними. В связи с этим не имеет значения, находится ли по другую сторону пленки лед или воздух. Поэтому снижение матричного потенциала грунтов как в условиях промораживания, так и при оттаивании из-за адсорбционной силы можно считать одинаковым [182; 200]. Капиллярная сила на границе раздела воздух-вода, лед-вода и воздух-лед, прямо пропорциональна поверхностной энергии на границе. Поверхностная энергия на границе

воздух-вода выше, чем на границе лед-вода [200]. Из-за этого снижение матричного потенциала грунта, обусловленное капиллярной силой, различается в мерзлом и талом состоянии.

Для преобразования отрицательной температуры в криогенное всасывание и наоборот используется уравнение Клапейрона. Для незасоленных мерзлых грунтов в окончательном виде данное уравнение имеет следующий вид [190]:

$$\psi_{cryo} = p_i - p_w = -L\rho_w \ln\frac{T + 273{,}15}{T_0 + 273{,}15}, \qquad (4.21)$$

где, ψ_{cryo} – криогенное всасывание, кПа, ρ_w – плотность воды, кг/м^3, T – температура грунта, T_0 – температура замерзания воды, L – скрытая теплота таяния/замерзания воды, кДж/кг. Теоретический предел всасывания грунта (10^6 кПа), используя данное уравнение, можно преобразовать в отрицательную температуру –259,47°C.

Криогенное всасывание отображает разницу давления между поровой водой и льдом в мерзлом грунте. Концептуально криогенное всасывание схоже с всасыванием в немерзлых ненасыщенных грунтах. SFCC можно разделить на три области, аналогичные с SWCC: область граничного эффекта, переходная область и остаточная область (Рисунок 28) [67; 190].

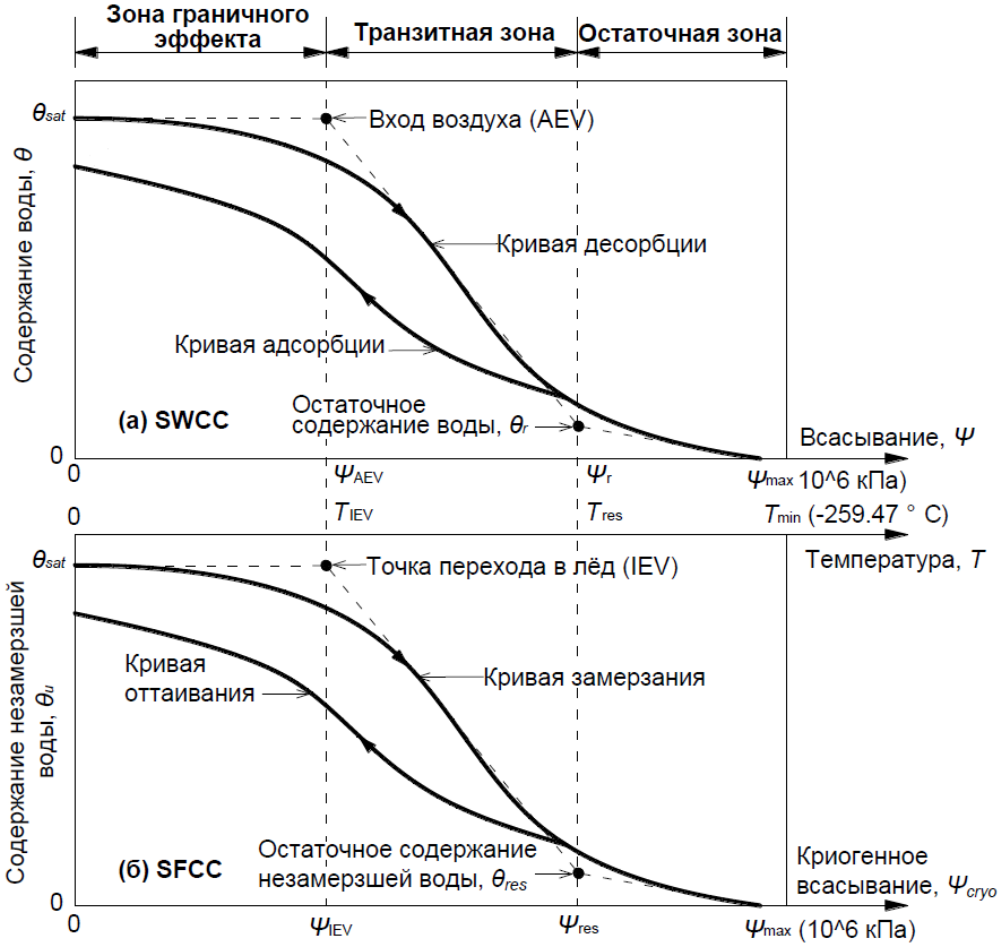


Рисунок 28 – Принципиальное сходство графиков SWCC и SFCC (по материалам автора [67])

Температура замерзания грунта может быть определена как точка перехода в лед (IEV), которая соответствует значению входа воздуха (AEV) в SWCC. На этой стадии остается значительное количество жидкой воды, кристаллы льда увеличиваются в размерах и проникают в более мелкие поры. По мере снижения температуры грунта, все большее количество воды заменяется льдом. Для дальнейшего уменьшения количества незамерзшей воды требуется чрезвычайно низкая температура, то есть высокое криогенное всасывание. Оставшееся незамерзшая вода прочно удерживается на поверхности минеральных частиц в виде тонких пленок и заключена в наиболее мелких порах. Эта критическая точка определяет остаточное содержание незамерзшей воды.

Стоит подчеркнуть, что во многих работах показано, что начальный участок кривой содержания незамерзшей воды будет определяться начальной влажностью грунта (Рисунок 29). Также форма SFCC зависит от начального коэффициента пористости, начальной влажности, скорости охлаждения и цикла промерзания/оттаивания [126; 168; 179; 180].

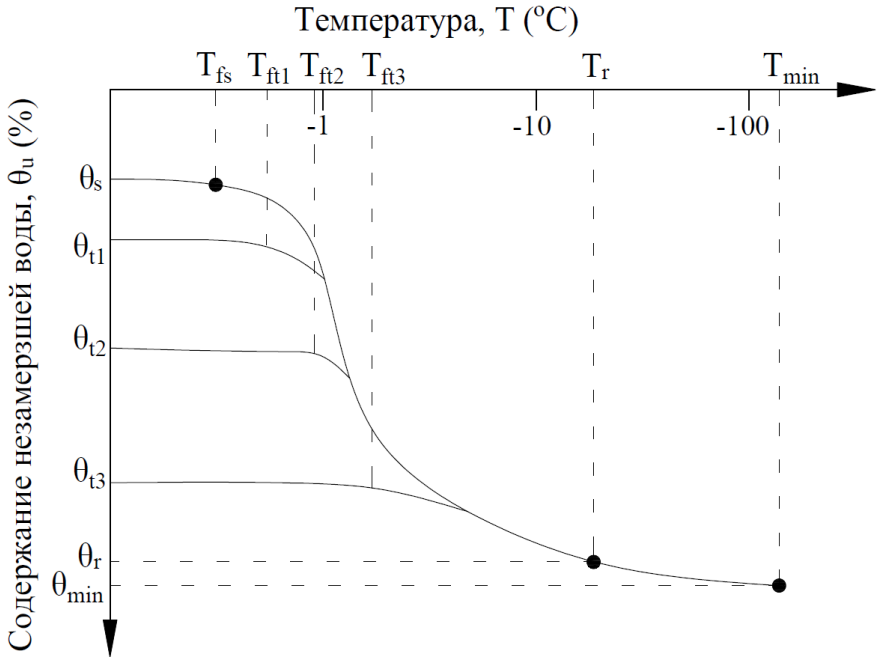


Рисунок 29 – Кривые замерзания грунта SFCC при различной влажности грунта (по материалам автора [67]). θ_s – содержание воды в водонасыщенном состоянии; θ_r – остаточное содержание воды, θ_t – начальное содержание воды; θ_{min} – минимальное содержание воды; T_{fs} – температура замерзания при полном водонасыщении; T_{ft} – температура замерзания при начальном содержании воды; T_r – температура при остаточном содержании воды

По современным данным, кривые SWCC при высыхании (десорбции) и насыщении (адсорбции) имеют различающийся вид. В зарубежной литературе это различие принято называть гистерезисом. Кривая зависимости между температурой и количеством незамерзшей воды (SFCC), имеет гистерезисное поведение, подобно кривой влажности (SWCC). Данный аспект в зарубежной литературе объясняется следующими возможными причинами:

1. Переохлаждение поровой воды [132; 157; 204].

2. Влияние электролитов [132; 204]. В процессе замерзания поровой воды и превращении ее в лед, происходит высвобождение растворенных веществ, что увеличивает концентрацию порового раствора. Это приводит к понижению точки замерзания поровой воды, что, в свою очередь, вызывает гистерезис.

3. Геометрия пор [125]. Гистерезис особенно заметен в грунтах, где присутствует значительное количество цилиндрических пор.

4. Блокировка пор. Согласно исследованиям Bittelli [132] и Anderson [125], эффект «бутылочного горлышка», возникающий из-за больших пор с узкими участками, может быть основной причиной гистерезиса, который обычно наблюдается при фазовом переходе воды в газообразное состояние в грунтах с широким распределением взаимосвязанных пор разного радиуса. Этот же эффект может вызывать гистерезис и при фазовом переходе воды в лед. К схожим выводам также приходит Б.А. Савельев [94].

5. Частицы грунта обычно меняют свое положение, так как поры расширяются из-за образования льда во время процесса замерзания. В результате образуется больше крупных пор, чем было до замерзания [175].

Наиболее подробно тема гистерезиса описана в работах коллектива китайских исследователей [201,203]. Таяние льда в грунте начинается с самых мелких пор и постепенно распространяется на более крупные. По этой причине, при одинаковом количестве незамерзшей воды, температура на стадии оттаивания выше, чем на стадии замерзания. Как отмечено в некоторых работах, при решении практических задач часто гистерезисом характеристической кривой можно пренебречь [130].

4.4 Использование характеристической кривой влажности для оценки содержания незамерзшей воды

Для построения кривой SFCC требуется определить количество незамерзшей воды экспериментальным методом, а затем при помощи уравнения Клапейрона определить всасывание. Однако ввиду того, что данные лабораторные испытания сложны и дороги, множеством исследователей были предложены методики перехода с кривой SWCC, которая определяется на грунте в талом состоянии.

Следует также отметить, что отечественные исследователи связывают содержание незамерзшей воды и температуры начала замерзания грунтов с величиной потенциала поровой воды. Применение данного подхода позволило получить хорошую сходимость расчетных и экспериментальных данных [41; 112; 114].

Далее рассмотрены наиболее актуальные и популярные методики, позволяющие определить график зависимости содержания незамерзшей воды от отрицательной температуры (SFCC) в дисперсных грунтах, основанные на использовании характеристической кривой влажности грунтов (SWCC). Приведенные далее формулы для построения кривой SFCC базируются на адаптации двух наиболее распространенных методик построения кривой SWCC – Фредлунда и ван Генухтена [149; 206].

Уравнение, используемое в модели ван Генухтена выглядит следующим образом [206]:

$$\theta(\psi) = \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (a_{vg}\psi)n_{vg}\right]^{m_{vg}}} + \theta_r, \tag{4.22}$$

где θ_s – влажность водонасыщенного грунта, θ_r – остаточное содержание воды, ψ – давление всасывания, кПа, a_{vg}, n_{vg}, m_{vg} – параметры аппроксимации кривой.

Фредлундом для построения характеристической кривой было предложено уравнение [150]:

$$\theta(\psi) = C(\psi)\frac{\theta_s}{\left\{\ln\left[2,718 + \left(\frac{\psi}{a_f}\right)^{n_f}\right]\right\}^{m_f}}, \tag{4.23}$$

где θ_s – влажность водонасыщенного грунта, ψ – давление всасывания, a_f, n_f, m_f – параметры аппроксимации характеристической кривой, $C(\psi)$ – поправочный коэффициент, определяемый по формуле:

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \frac{\psi}{\psi_r})}{\ln\left[1 + \left(\frac{10^6}{\psi_r}\right)\right]}, \tag{4.24}$$

где, ψ_r – давление всасывания при остаточном содержании воды, принимаемый для глинистых грунтов равным 3000 кПа, для песчаных – 150 кПа.

Цель использования данных уравнений заключается в построении полной теоретической кривой зависимости давления всасывания от влажности по результатам выборочных лабораторных определений.

Уравнения позволяющие перейти от характеристической кривой влажности к кривой зависимости содержания незамерзшей воды от температуры и всасывания по мере исследований модифицировались различными авторами, что на данный момент позволило добиться высокой точности при сравнении с экспериментальными данными [130]. Наиболее распространенные на данный момент зависимости приведены в Таблице 15.

Таблица 15 – Современные методики определения содержания незамерзшей воды при использовании характеристической кривой влажности (SWCC).

Авторы	Формулы
van Genuchten – Bittelli [132]	$\theta_u = (\theta_s - \theta_r)\left[1+\left(-a_v \frac{LT}{gT_0}\right)^{n_v}\right]^{-m_v} + \theta_r$
van Genuchten – Nishimura [183]	$\theta_u = \left[1+\left(-\frac{L\rho_w \ln\left(\frac{T+273,15}{273,15}\right)}{a_v}\right)^{\frac{1}{1-m_v}}\right]^{-m_v}$
van Genuchten – Ren [190]	$\theta_u = \theta_r + (\theta_s - \theta_r)\left[1+\left(-a_v L\rho_w \ln\frac{T+273,15}{T_0+273,15}\right)^{n_v}\right]^{-m_v}$
van Genuchten – Zhou [221]	$\theta_u = (\theta_s - \theta_r)\frac{1}{\left[1+(a_v(-T))^{n_v}\right]^{m_v}} + \theta_r$
van Genuchten – Wen [211]	$\theta_u = \theta_r + (\theta_0 - \theta_r)\frac{1}{\left[1+\left(-\frac{a_v L\rho_w T}{273,15}\right)^{n_v}\right]^{m_v}}$
Fredlund and Xing – Ren [190]	$\theta_u = \frac{\theta_s}{\left\{\ln\left[2,718+\left(-\frac{L\rho_w}{a_f}\ln\left(\frac{T+273,15}{T_0+273,15}\right)\right)^{n_f}\right]\right\}^{m_f}}$
Fredlund and Xing – Zhou [221]	$\theta_u = (\theta_s - \theta_r)\frac{1}{\left\{\ln\left[2,718+\left(-\frac{T}{a_f}\right)^{n_f}\right]\right\}^{m_f}} + \theta_r$
Fredlund and Xing – Wen [211]	$\theta_u = C(T)\frac{\theta_0}{\left\{\ln\left[2.718+\left(-\frac{L\rho_w T}{273,15a_f}\right)^{n_f}\right]\right\}^{m_f}}; C(T) = 1-\frac{\ln\left(1-\frac{L\rho_w T}{273,15\psi_r}\right)}{\ln\left(1+\frac{1000000}{\psi_r}\right)}$
Fredlund and Xing – Wen, C=1 [211]	$\theta_u = \frac{\theta_0}{\left\{\ln\left[2,718+\left(-\frac{L\rho_w T}{273,15a_f}\right)^{n_f}\right]\right\}^{m_f}}$

Обозначения в формулах: θ_s – объемная влажность в водонасыщенном состоянии д.е.; θ_r – остаточная объемная влажность д.е.; θ_o – природная объемная влажность д.е.; L – скрытая теплота таяния/замерзания воды, Дж/кг; ρ_w – плотность воды г/см^3; T – температура грунта, °C; T_0 – температура замерзания воды, °C; a_f, m_f, n_f – параметры модели Фредлунда; a_v, n_v, m_v - параметры модели ван Генухтена

Следует подчеркнуть, что эти зависимости применимы только для незасоленных грунтов. Как показано в работе Y. Wu зависимости позволяющие описать содержание незамерзшей воды в засоленных грунтах имеют значительно большую сложность [212].

По результатам метаанализа и статистических расчетов, выполненных коллективом китайских исследователей, большинство данных, полученных с использованием описанных выше методик, находятся в пределах отклонения ±10% от среднего значения для всего диапазона содержания незамерзшей воды [130]. Это свидетельствует о том, что все модели показывают хорошие результаты при оценке содержания незамерзшей воды для всех образцов грунта.

Как было сказано ранее, оценка содержания незамерзшей воды необходима для построения зависимости коэффициента теплопроводности грунтов от температуры. Данные зависимости являются необходимыми исходными данными для решения теплофизических задач численными методами. Подход по использованию методики SWCC будет продемонстрирован на примере ранее рассматриваемой выборки глинистых грунтов (Таблица 7, образцы 1–15).

При отсутствии экспериментально определенных данных давления всасывания, предлагается использовать способ, позволяющий получить параметры (a_f, m_f, n_f), описывающие кривую SWCC для глинистых грунтов исходя из их физических свойств в модели Фредлунда. Определение параметров SWCC возможно исходя из влажности на границе раскатывания W_P и содержания частиц <0,075 мм [217]:

$$a_f = 0,00364(\omega W_P)^{3,35} + 4(\omega W_P) + 11, \quad (4.25)$$

$$m_f = 0,0514(\omega W_P)^{0,465} + 0,5, \quad (4.26)$$

$$n_f = m_f[-2,313(\omega W_P)^{0,14} + 5], \quad (4.27)$$

где ω – содержание частиц <0,075 мм, д.е., W_P – влажность на границе раскатывания, %.

Так как в отечественной практике при определении гранулометрического состава дисперсных грунтов не принято отделять фракцию 0,075 мм в расчетах было принято следующее допущение – процентное содержание данной фракции определялось путем деления процентного содержания фракции 0,05–0,1 мм на два и далее оно, соответственно, складывалось с общим содержанием фракций менее 0,05 мм (Таблица 16). Значение влажности на границе раскатывания W_P из зарубежной классификации допустимо приравнивать к соответствующей влажности, определяемой в отечественной практике [26].

График содержания незамерзшей воды от криогенного всасывания и температуры далее будет определен при помощи модели Фредлунда – Сина – Рена [190]:

$$\theta_u = \frac{\theta_s}{\left\{ \ln\left[2,718 + \left(-\frac{L\rho_w}{a_f} \ln\left(\frac{T + 273,15}{T_0 + 273,15} \right) \right)^{n_f} \right] \right\}^{m_f}}, \quad (4.28)$$

где θ_s – объемная влажность грунта в водонасыщенном состоянии, д.е.; T – отрицательная температура, °C; T_0 – температура замерзания воды, принимаемая 0°C; ρ_w – плотность воды, г/см^3; L – скрытая теплота таяния/замерзания воды, Дж/кг; a_f, m_f, n_f – параметры модели Фредлунда.

Таблица 16 – Некоторые физические характеристики и рассчитанные параметры кривой SWCC для выборки глинистых грунтов

№	Наименование грунта	Содержание частиц мене 0,075 мм, %	Влажность на границе раскатывания, %	Влажность весовая суммарная, %	Параметры модели Фредлунда		
		$d_{<0.075}$	W_P	W_{tot}	a_f	m_f	n_f
1	Супесь пылеватая нельдистая	79	17,5	17,7	90,4	0,67	1,12
2	Супесь пылеватая слабольдистая	85	15,6	18,4	85,0	0,67	1,13
3	Супесь пылеватая льдистая	83,5	19,7	37,9	123,2	0,69	1,08
4	Супесь пылеватая слабольдистая	75,8	19,7	29,1	101,9	0,68	1,10
5	Супесь пылеватая нельдистая	70,5	14,0	17,7	57,8	0,65	1,18
6	Супесь песчанистая слабольдистая	72,0	15,0	17,6	62,6	0,65	1,17
7	Суглинок пылеватый легкий слабольдистый	75	19,5	24,0	102,7	0,68	1,10
8	Суглинок пылеватый легкий слабольдистый	91	21,0	30,5	158,8	0,70	1,06
9	Суглинок пылеватый легкий слабольдистый	80	17,9	24,1	95,4	0,68	1,11
10	Суглинок пылеватый легкий слабольдистый	79	18,3	23,2	96,8	0,68	1,11
11	Суглинок легкий нельдистый	75	18,8	14,7	93,2	0,67	1,12
12	Суглинок пылеватый легкий нельдистый	81	18,8	19,2	105,3	0,68	1,10
13	Суглинок пылеватый легкий слабольдистый	82	20,0	30,5	119,3	0,69	1,09
14	Суглинок легкий слабольдистый	85	20,8	30,7	139,2	0,70	1,07
15	Глина пылеватая легкая нельдистая	96	31,8	36,5	483,8	0,75	0,95

Для достижения нулевой влажности в теоретическом пределе отрицательных температур (–259,47 °C) формула Фредлунда-Сина-Рена умножалась на поправочный коэффициент C(T) [211] аналогичный коэффициенту C(ψ) в модели Фредлунда (4.24):

$$C(T) = 1 - \frac{\ln\left(1 - \frac{L\rho_w T}{273{,}15\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{1000000}{\psi_r}\right)}. \quad (4.29)$$

Данная модель выбрана так как, позволяет не учитывать остаточное содержание незамерзшей воды θ_r, которое должно быть определено экспериментально.

Таким образом, строится график зависимости содержания незамерзшей воды от криогенного всасывания (Рисунок 30) или от отрицательной температуры (Рисунок 31) при помощи преобразования уравнения Клапейрона (4.21).

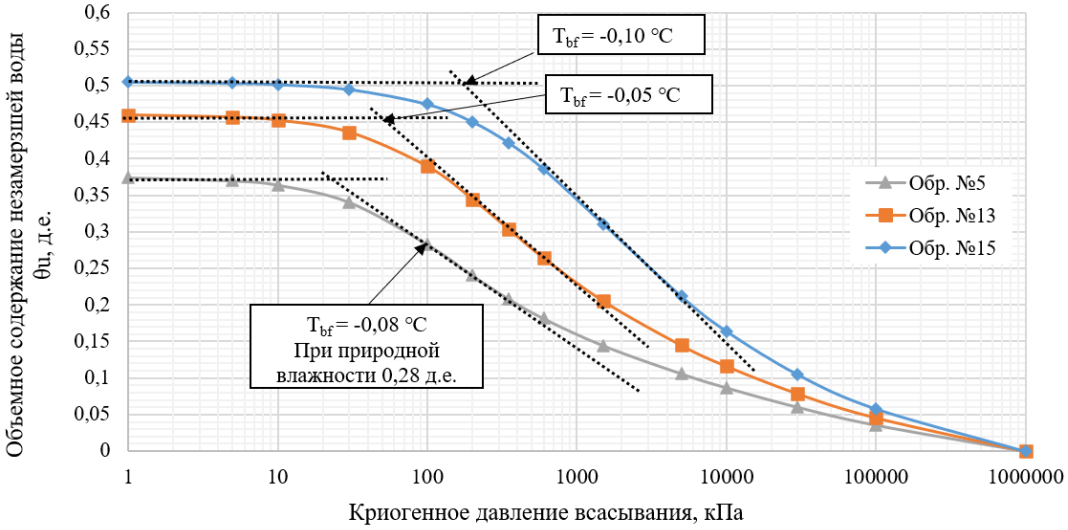


Рисунок 30 – Зависимость содержания незамерзшей воды от криогенного всасывания для некоторых рассматриваемых глинистых образцов

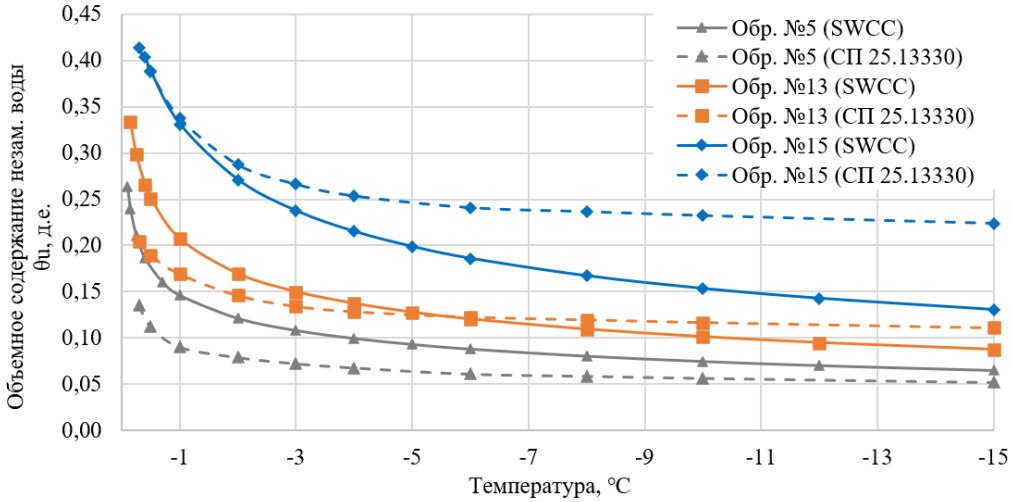


Рисунок 31 – Зависимость содержания незамерзшей воды от температуры для некоторых рассматриваемых глинистых образцов в сравнении с принятым в практике методом

Температура начала замерзания грунта определяется путем преобразования давления криогенного всасывания в точке перегиба графика (точка IEV, Рисунок 28), согласно уравнению Клапейрона (4.21), в отрицательную температуру. Если природная влажность грунта ниже влажности, соответствующей точки IEV, то температура начала замерзания определяется по значению всасывания, соответствующему этому значению влажности (Рисунок 30, обр. №5).

Сравнение полученных значений температуры замерзания T_{bf} при использовании методики SWCC и методами, учитывающими естественную влажность грунтов приведено в Таблице 17.

Таблица 17 – Температура замерзания грунтов, °С в зависимости от метода расчета

Метод / № обр.	T_{bf} (SWCC)	$T_{bf} = -0,045\left(\frac{W}{W_L}\right)^{-4}$	$T_{bf} = -0,729 W_P^{2,462} W^{-2}$	T_{bf} СП 25.13330
1	–0,10	–0,02	–0,27	–0,15
2	–0,09	–0,03	–0,20	
3	–0,08	–0,19	–0,08	
4	–0,05	–0,07	–0,13	
5	–0,08	–0,01	–0,15	
6	–0,08	–0,01	–0,19	
7	–0,09	–0,05	–0,21	–0,20
8	–0,05	–0,14	–0,14	
9	–0,09	–0,05	–0,16	
10	–0,05	–0,05	–0,17	
11	–0,11	–0,01	–0,46	
12	–0,05	–0,02	–0,28	
13	–0,05	–0,14	–0,13	
14	–0,08	–0,14	–0,14	
15	–0,10	–0,29	–0,28	–0,25

Как видно из приведенной таблицы, температуры замерзания в модели SWCC в целом имеют несколько завышенные значения относительно метода T. Kozlowski и СП 25.13330. Метод Федорова для некоторых образцов дает слишком высокие температуры замерзания.

Вычисленное содержание незамерзшей воды для каждого из рассматриваемых образцов приведено на Рисунках 32,33.

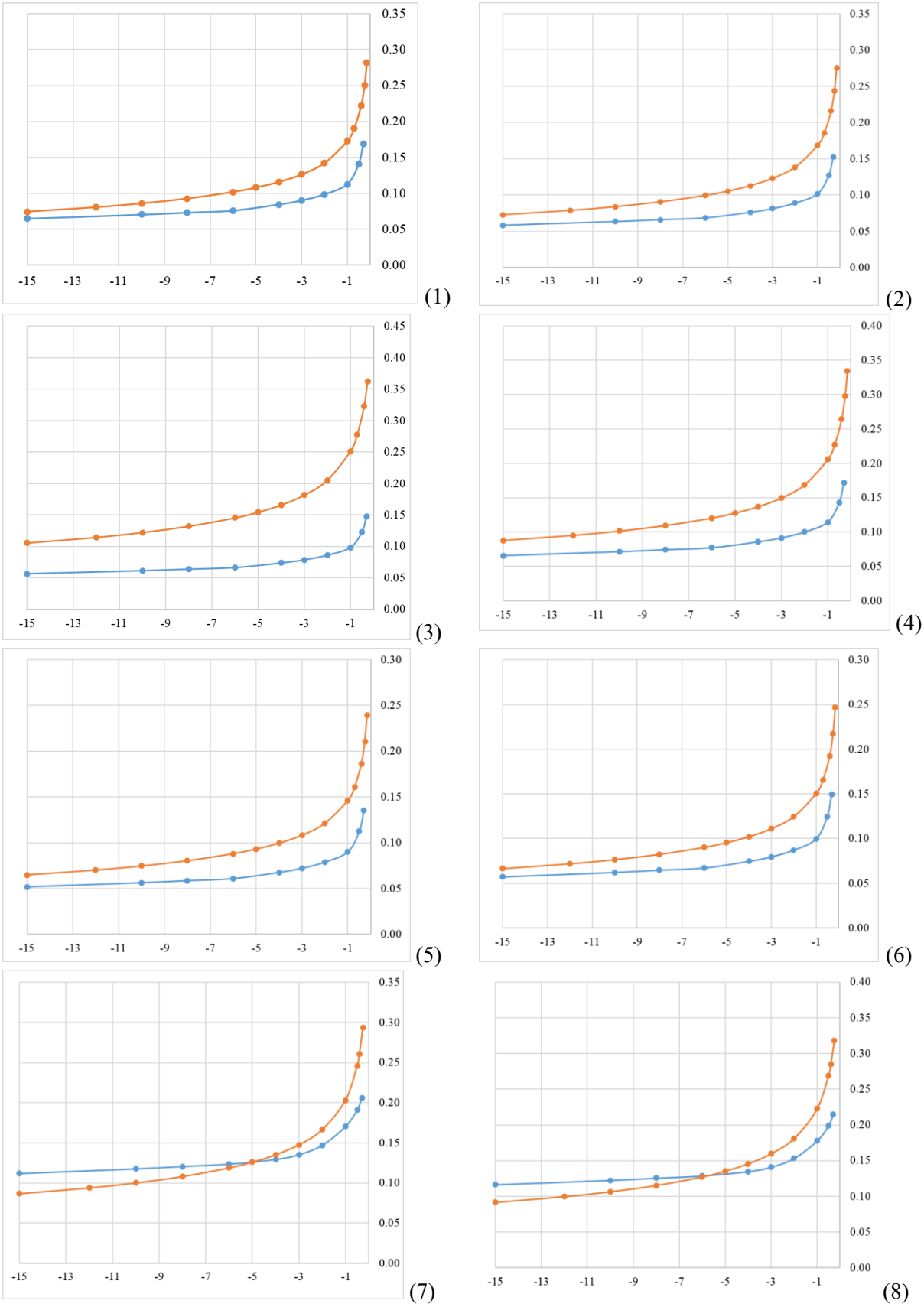
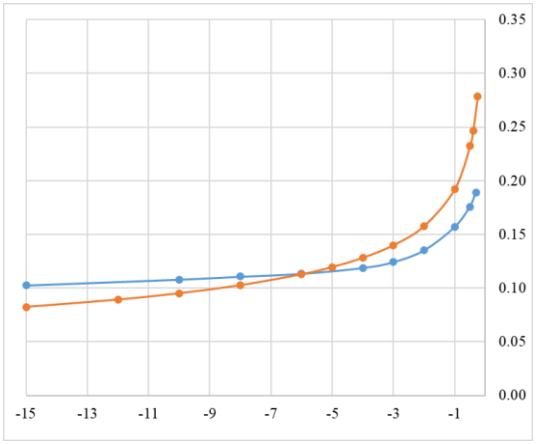
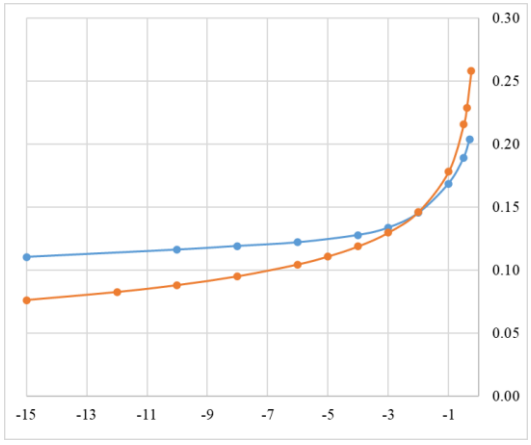


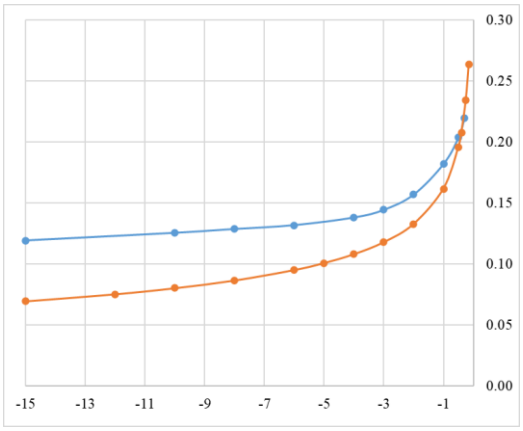
Рисунок 32 – Содержание незамерзшей воды для образцов 1–8 по методу SWCC в сравнении с принятым в практике методом. По вертикальной оси – объемное содержание незамерзшей воды, д.е.; по горизонтальной оси – температура, °С



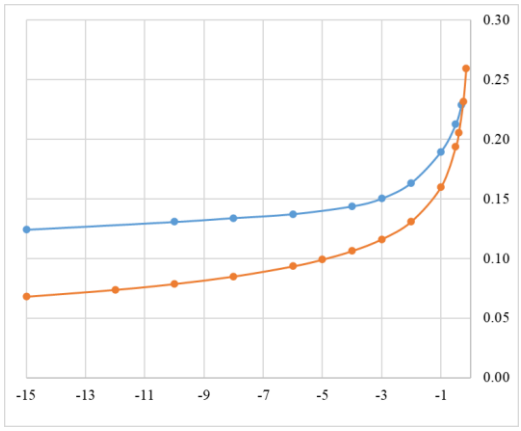
(9)



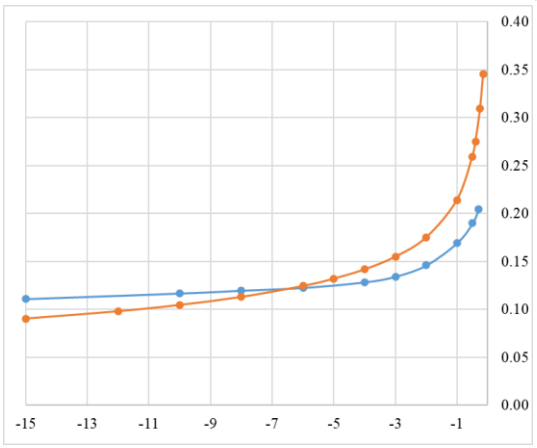
(10)



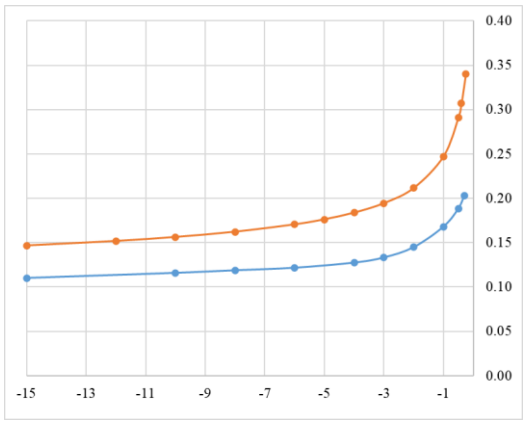
(11)



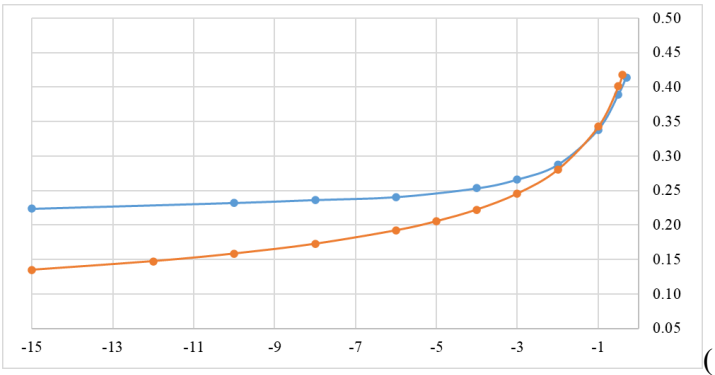
(12)



(13)



(14)



(15)

Метод СП 25.13330 Метод SWCC

Рисунок 33 – Содержание незамерзшей воды для образцов 9–15 по методу SWCC в сравнении с принятым в практике методом. По вертикальной оси – объемное содержание незамерзшей воды, д.е.; по горизонтальной оси – температура, °С

Для построения графиков зависимости теплопроводности грунтов от отрицательной температуры, полученные данные содержания незамерзшей воды могут быть интегрированы в модель теплопроводности Йохансена. Полученные зависимости отображены на Рисунках 34,35. Модель Йохансена выбрана как более эффективная модель по сравнению с моделью Фаруки, однако и в модели Фаруки также можно использовать полученные данные.

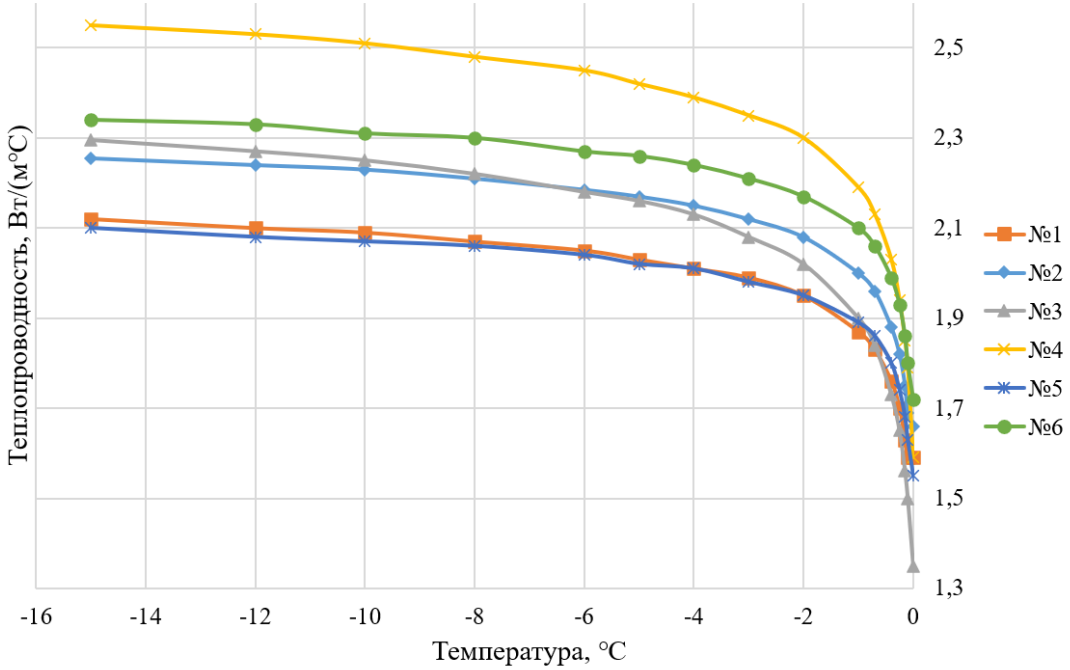


Рисунок 34 – Графики зависимости теплопроводности образцов супеси от температуры в модели Йохансена (способ учета теплопроводности частиц №4)

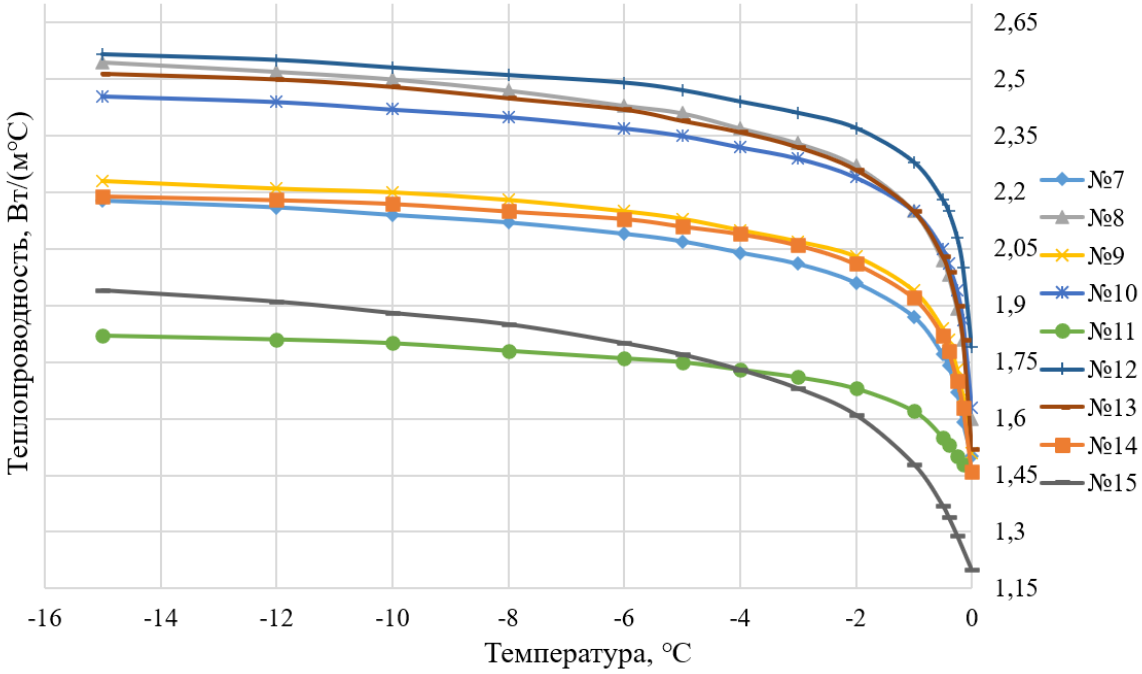


Рисунок 35 – Графики зависимости теплопроводности образцов суглинков от температуры в модели Йохансена (способ учета теплопроводности частиц №4)

4.5 Выводы

Содержание незамерзшей воды в мерзлых грунтах определяется совокупностью факторов, среди которых первостепенное значение имеют степень засоленности и гранулометрический состав. Последний, в свою очередь, косвенно отражает минеральный состав грунта. Существенным достижением отечественной научной школы является разработка методик определения температуры замерзания и влажности за счет незамерзшей воды в засоленных грунтах.

В рамках анализа зарубежных исследований рассмотрен опыт применения характеристической кривой влажности (SWCC) к мерзлым грунтам. Данная методика широко используется для описания термодинамического состояния поровой влаги и позволяет учитывать взаимосвязь между температурой, капиллярно-сорбционными свойствами и фазовым состоянием воды. В то же время в отечественной практике наблюдается недостаточная степень изученности данного вопроса, особенно в части лабораторного определения параметров характеристической кривой влажности.

В связи с этим в настоящий момент представляется возможным использование косвенных методов построения характеристической кривой влажности для глинистых грунтов на основе их физических свойств. Вместе с тем повышение достоверности получаемых результатов требует дальнейшей экспериментальной проверки и уточнения используемых зависимостей на основе качественных лабораторных исследований.

Рассмотренный подход, использующий характеристическую кривую влажности, позволяет определить содержание незамерзшей воды и температуру замерзания (оттаивания) для незасоленных глинистых мерзлых грунтов (третье защищаемое положение).

Следует отметить, что теплопроводность мерзлых грунтов не является постоянной величиной и существенно зависит от температуры. Данная зависимость обусловлена изменением содержания незамерзшей воды, которая играет важную роль в процессах теплопереноса. Зависимость содержания незамерзшей воды от температуры может быть использована в рассмотренных моделях теплопроводности мерзлых грунтов, повышая точность расчетов температурного поля грунтов при численном теплофизическом моделировании.

Дальнейшее развитие исследований в области применения характеристической кривой влажности представляется актуальным в контексте решения сопряженных задач тепломассопереноса, включающих одновременное определение температурного поля и миграции влаги в грунтах.

ГЛАВА 5. СТОХАСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

На сегодняшний день методы численного анализа позволяют проводить сложные теплофизические расчеты, однако в условиях высокой неопределенности исходных данных, классические детерминированные подходы могут оказаться недостаточно информативными так как не позволяют применять теорию надежности и делать оценку рисков.

Промерзание и оттаивание грунтов представляет собой сложный физико-химический процесс, который сопровождается одновременным тепло- и массопереносом в талой и промерзающей зонах, фазовыми переходами воды, химическими превращениями, а также возникновением напряжений и деформаций, приводящих к структурообразовательным процессам. В силу высокой многофакторности процесса и зависимости его интенсивности от множества параметров различной физической природы формальное описание с помощью детерминированных моделей сталкивается со значительными трудностями. Прогнозирование требует достоверной информации о совокупности характеристик, включающей состав, строение и физико-механические свойства грунтов, а также термобарические условия, в которых протекают процессы промерзания и оттаивания. Дополнительный осложняющий фактор – это ошибки в измерениях, возникающие при сборе, накоплении и анализе информации, которые искажают и без того ограниченные данные об инженерно-геокриологических условиях. Поэтому создание комбинированных стохастических моделей сегодня особенно актуально [83].

Использование стохастического моделирования дает возможность учитывать факторы неопределенности и оценивать состояние ЛТС с позиций теории надежности, что позволяет уменьшить общую неопределенность в оценке состояния ЛТС. В то же время К. В. Кургузов подчеркивает, что, несмотря на очевидные перспективы развития, этот подход сталкивается с рядом методологических и организационных трудностей, основными из них являются «высокий уровень «психологического барьера» и дефицит достоверных исходных статистических данных» [56].

В настоящее время в отечественной инженерно-геологической практике стохастическим методам уделяется все больше внимание и активно используются для решения задач устойчивости склонов, осадок фундаментов и др. Так прежде всего стоит отметить работы Болдырева Г.Г., Фоменко И.К., Кургузова К.В., Зеркаля О.В., Самарина Е.Н., Кропоткина М.П., Маций С.И. и др. [23; 40; 57; 60; 78; 85].

Как отмечает Павлов А.В., количественный геокриологический прогноз нуждается в сочетании детерминированных и стохастических методов, ввиду высокой неопределенности используемых входных данных и способов верификации математических моделей [74].

Однако стохастический подход к решению геотехнических задач в криолитозоне на данный момент не получил широкого распространения, прежде всего из-за высокой сложности численного моделирования теплофизических процессов (особую сложность представляет наличие временного фактора). Интеграция стохастических подходов в существующие детерминированные модели сопряжена с рядом технических и методологических трудностей, что ограничивает их применение в практике.

5.1 Источники неопределенности при решении теплофизических задач

При решении теплофизических задач существует множество источников неопределенности, которые влияют на точность прогнозов и решений, что делает анализ и управление ими крайне важным.

Б. Д. Кауфман и С. Г. Шульман понимают под неопределенностью «ситуацию неоднозначности или неполноты информации при принятии проектных решений» [43]. «Неопределенность является важной, причинной категорией, обуславливающей необходимость возникновения вероятностно-статистических подходов» [164]. Изучение и анализ неопределенности требуют решения двух основных задач: построения расчетной модели неопределенности (с количественным описанием различных аспектов), учет данной модели в стохастических расчетах.

Einstein H. H. и Baecher G.B. отмечают, что неопределенность широко распространена в инженерной геологии и имеет четыре основных источника [141]:

– пространственная изменчивость свойств грунтов;

– ошибки при оценке свойств грунтов;

– принимаемые допущения при описании физических процессов (ограничения математических моделей);

– упущения в расчетах – невозможность учета всех аспектов рассматриваемой сложной системы.

К.В. Кургузов отмечает следующие основные факторы неопределенности ЛТС [56]:

- природная неоднородность грунтов;
- неопределенность, связанная с изменением свойств грунтов во времени;
- малая изученность площадки строительства;
- степень достоверности расчетных моделей;
- ошибки измерения;
- изменчивость факторов нагрузок и воздействий на ЛТС;
- неопределенность статистических методов;
- ошибки за счет человеческого фактора в принимаемых проектных решениях.

Помимо общих факторов неопределенности характерных для ЛТС стоит обратить внимание на особенно важные факторы при прогнозе поведения КЛТС:

1. Вероятностный характер климатических факторов – температура воздуха, скорость ветра, величина снежного покрова и др., а также долгосрочная изменчивость климата.
2. Неопределенность ландшафтных условий, изменение их во времени, в том числе за счет техногенных преобразований (альбедо поверхности, растительность, экспозиция и др.).
3. Увеличение ошибок измерения различных параметров ввиду увеличения их количества.
4. Сильная схематизация математической задачи ввиду ее высокой сложности, а также необходимость решения не только механической задачи, но и теплофизической.
5. Высокая степень зависимости изменения свойств и состояния грунтов во времени, определяющая состояние КЛТС.
6. Высокая неоднородность текстуры, структуры и свойств мерзлых грунтов.
7. Неопределенность в определении граничных условий.
8. Общая чувствительность системы к малейшим изменениям ее компонентов, многочисленные обратные связи.

Существует два подхода к методам формализации неопределенности исходных данных [17;42]. Первый подход предполагает снижение влияния неопределенности путем предварительной обработки и обобщения исходных данных с последующим применением детерминированных методов расчета. Именно этот принцип положен в основу большинства действующих НТД, где влияние случайных факторов учитывается через систему коэффициентов запаса.

Второй подход основан на вероятностном представлении исходных параметров. В этом случае характеристики объекта рассматриваются как случайные величины, описываемые соответствующими законами распределения и статистическими параметрами. Такой подход позволяет выполнять количественную оценку надежности сооружений и определять вероятность их безотказного функционирования в заданных условиях эксплуатации.

Одним из первых отечественных авторов, подробно отразивших важность и методологию применения стохастического подхода к решению задач проектирования в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов был Л.Н. Хрусталев. Автором была предложена аналитическая методика оценки надежности [36; 107; 108].

За стохастические параметры могут приниматься: средняя годовая температура наружного воздуха, средняя годовая скорость ветра, среднее за зимний период термическое сопротивление снежного покрова, коэффициент условий работы проветриваемого подполья

здания, температура воздуха в здании и грунтовые характеристики по каждому выделенному в пределах грунтового разреза литолого-генетическому слою [107].

При этом автором был оценен и экономический фактор при решении задач – критерий надежности должен быть комплексным и учитывать как стоимостные показатели, так и надежность. Отражен важный вывод, что при большей стоимости здания (меньшему значению экономического коэффициента) должны соответствовать большие надежность основания и оптимальный коэффициент надежности (запаса) [109].

5.2 Основные положения теории надежности

Вопрос обеспечения надежности сооружений занимает центральное место в практике проектирования и строительства. Надежность ЛТС рассматривается как главный критерий по сравнению с эффективностью или качеством, поскольку в случае потери устойчивости или разрушения системы все прочие параметры перестают быть актуальными. Под надежностью понимается способность объекта выполнять заданные функции в течении заданного срока службы, а под отказом – случайное событие, при котором не выполняются одно или несколько условий предельных состояний [27; 29]. Таким образом, одним из показателей надежности сооружения является вероятность его безотказной работы в течение расчетного срока службы.

Граница области допустимых состояний ЛТС является стохастической и характеризует поведение общей системы основание-сооружение. Определение уровня безопасности этой системы чрезвычайно сложная задача, поэтому в целях упрощения ее решения систему следует разбить на две подсистемы – основание и сооружение и далее оценить безотказность каждой из них с последующей увязкой их между собой [107].

Как отмечает Л.Н. Хрусталев, вопрос безотказности сооружений на современном этапе условно можно считать решенным [107]. Разработаны многочисленные нормативные документы, описывающие критерии безопасности сооружений для разных конструктивных схем (например, допустимые осадки). Поэтому наибольшее внимание следует уделять подсистеме «основание». Для этой подсистемы граница области допустимых состояний подсистемы «сооружение» условно может быть принята детерминированной. Данный подход к выбору критерия безотказной работы системы «основание-сооружение» (ЛТС) правомерен, так как позволяет получить некоторый запас устойчивости.

Согласно Кодексу вероятностных моделей [209], характерной особенностью геотехнических сооружений является доминирующая роль факторов неопределенности в свойствах грунтов. Стохастическая природа любых свойств грунтов закладывается не только в ходе происходящих в процессе эксплуатации объекта сложных инженерно-геокриологических процессов, а еще на этапе лабораторного определения. В обычной практике, при

детерминированном расчете, используются средние значения параметров, полученных для определенной выборки различных образцов грунта.

Количественная оценка надежности на основе вероятностного подхода представляет собой объективный инструмент обоснования принимаемых проектных решений. Данный подход широко применяется в инженерной практике за рубежом на протяжении нескольких десятилетий [148; 189]. Как отмечает Кургузов К.В., «совершенствование численных методов обеспечило качественно новый уровень стохастического моделирования, что позволило составлять многомерные вероятностные модели, которые учитывают широкий спектр неопределенностей» [56]. Данный аспект особенно актуален для проектирования и строительства сооружений повышенного уровня ответственности.

В настоящее время в теории надежности сформулированы два основных принципа, которые являются основой для практики проектирования [56]:

1. Абсолютная надежность геотехнических систем недостижима.
2. Разработка количественных методов оценки надежности проектируемых сооружений должна базироваться на вероятностно-статистическом подходе [189].

Современные исследования ряда отечественных и зарубежных авторов сыграли большую роль в совершенствовании методов расчета сооружений и решении задач оптимизации параметров ЛТС [10; 21; 86; 89; 105; 118; 119].

Как справедливо отмечено Л.Н. Хрусталевым, внедрение вероятностно-экономического подхода в практику проектирования – процесс довольно длительный и требует развития нормативной базы проектирования [107]. Поэтому авторами предложено взять за основу критерия надежности существующие коэффициенты надежности (γ_n) по назначению сооружений (в зависимости от уровня ответственности) [36]. Также стоит отметить, что необходимость учета фактора времени значительно усложняет задачу оценки безотказности ЛТС, имеющей в своем составе мерзлые грунты по сравнению, например, с оценкой безотказности ЛТС с талыми (немерзлыми) грунтами.

Основные успехи в определении критериев надежности ЛТС, при использовании стохастического подхода к проектированию, отражены в зарубежных исследованиях. Так, согласно переведенному на русский язык нормативному документу Европейского союза [73], регламентирующего основные положения проектирования сооружений мерой надежности считается вероятность безотказной работы системы (P_s):

$$P_s = (1 - P_f), \tag{5.1}$$

где P_f – вероятность отказа рассматриваемого вида в течение соответствующего периода времени.

Если рассчитанная вероятность отказа выше, чем ее заданное целевое значение P_0, то сооружение должно рассматриваться как не надежное.

Для классификации уровня надежности используется индекс β, в котором принимается во внимание известная или предполагаемая статистическая изменчивость воздействий и расчетных сопротивлений, а также неопределенность расчетной модели (Таблица 18) [73].

Таблица 18 – Рекомендуемые минимальные значений β (для предельных состояний по несущей способности) [73]

Класс надежности	Минимальные значения β	
	Годовой базовый период	50-ти летний базовый период
RC3	5,2	4,3
RC2	4,7	3,8
RC1	4,2	3,3

Взаимосвязь между индексом β и вероятностью отказа P_f показана в Таблице 19.

Таблица 19 – Связь P_f в зависимости от β [73]

P_f	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
β	1,28	2,32	3,09	3,72	4,27	4,75	5,20

Классы надёжности сооружений RC1, RC2 и RC3 соотносятся с классами последствий их возможного разрушения CC1, CC2 и CC3 соответственно. Класс CC3 характеризуется тяжёлыми последствиями для жизни и здоровья людей, а также значительным экономическим, социальным и экологическим ущербом. Класс CC2 соответствует среднему уровню последствий, связанному с существенными экономическими, социальными и экологическими потерями. Для класса CC1 характерны незначительные последствия для людей и минимальный ущерб экономического, социального или экологического характера.

Департаментом военных инженеров армии США [143] разработан общий подход к оценке надежности через показатель уровня надежности, который зависит от вероятности отказа системы (Рисунок 36). Применение данного показателя обеспечивает возможность сопоставления надежности различных объектов и назначения требуемого уровня безопасности с учетом последствий возможного отказа.

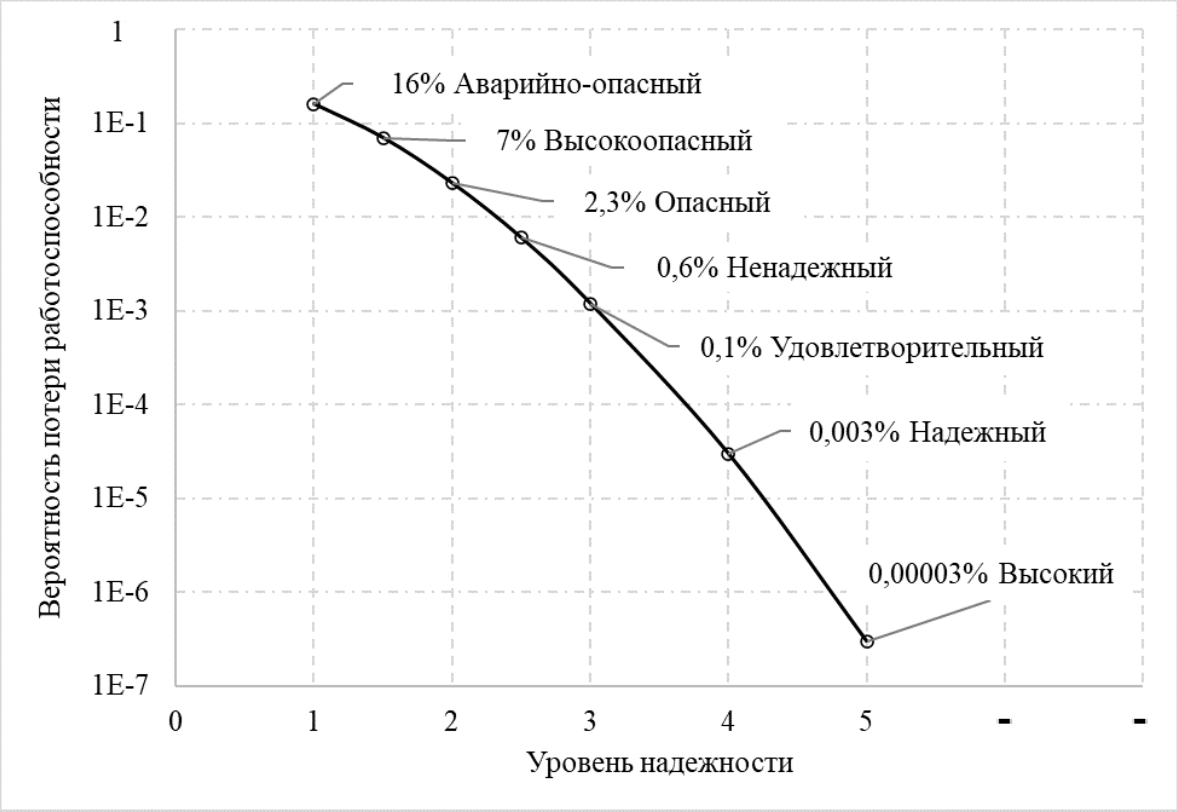


Рисунок 36 – Уровни надежности [143]

5.3 Метод точечной оценки

В настоящее время основным способом численного решения стохастических задач в инженерной геологии является метод Монте-Карло. Популярность данный метод получил с началом широкого использования ЭВМ. Теоретической основой метода Монте-Карло является закон больших чисел, устанавливающий при определенных условиях предельное равенство среднего арифметического случайной величины ее математическому ожиданию при бесконечном увеличении числа опытов.

Метод позволяет получить распределение элементов пространства выходных параметров по совокупности их значений, получаемых в результате множества реализаций случайного процесса на ЭВМ. То есть решение любой задачи повторяется m раз при этом каждое решение не зависит от остальных, и по совокупности решений строится статистическая оценка функции безотказности. Согласно теореме Бореля при $m \to \infty$ $P_m(t) \to P(t)$. Так как метод Монте-Карло подразумевает большое число реализаций (сотни и тысячи), то статистическая оценка функции безотказности практически не отличается от самой функции [107].

Однако основным недостатком метода Монте-Карло является то, что он требует большого количества вычислительного времени (особенно при решении теплофизической задачи). В существующих численных программных комплексах не реализована возможность

использования данного метода, что делает его недоступным для широкого применения в практике решения задач по оценке состояния КЛТС.

Необходимость учета фактора времени значительно усложняет задачу вероятностно-статистического расчета мерзлых оснований по сравнению, например, с расчетом талых оснований, переводя ее в разряд задач теории случайных процессов [36].

Поэтому далее будет рассмотрен достаточно простой метод точечной оценки, позволяющий получить необходимые решения для оценки КЛТС с точки зрения теории надежности.

«Метод точечной оценки (point estimate method, PEM) позволяет анализировать, как неопределенности во входных параметрах создают неопределенность в результатах расчета. Он позволяет не ограничиваться одним детерминированным анализом с наиболее вероятными параметрами, а оценивать надежность, рассматривая дисперсию входных параметров» [70].

Сущность метода заключается в вычислении решений в различных точках оценки и объединении их с надлежащим взвешиванием, чтобы получить приближенное распределение решений и является методом двухточечной оценки для первого и второго момента некоррелированных переменных [135; 142; 156; 192]. Метод требует 2^n оценок решения, где n – количество случайных величин. Распределение функции $y= f(x_1,x_2,x_3…x_n)$ находится по формулам:

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^{2^n} wf_i , \tag{5.2}$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i}^{2^n} wf_i^2 - \left[\sum_{i}^{2^n} wf_i\right]^2} , \tag{5.3}$$

где веса w задаются как $1/2^n$, f_i – последовательные оценки f при 2^n возможных комбинациях случайных величин в точках оценки, т.е. при $\overline{y_n} + \sigma_{x_n}$ и $\overline{y_n} - \sigma_{x_n}$. В представленном решении предполагается, что все входные и переменные и выходные переменные соответствуют нормальному распределению, заданному их средним $\bar{x}$ и стандартным отклонением σ_x.

Принцип вычисления вероятностной функции при использовании метода точечной оценки отображен на Рисунке 37.

Аппроксимация с использованием точечных оценок делает его вычислительно эффективным и позволяет выполнять статистический анализ задач, для которых другие методы, такие как моделирование Монте-Карло сложно выполнимы и практически не реализуемы. Однако его простота накладывает некоторые ограничения.

Метод точечной оценки основан на нормально распределенных, некоррелированных данных, в противном случае результаты могут быть неточными.

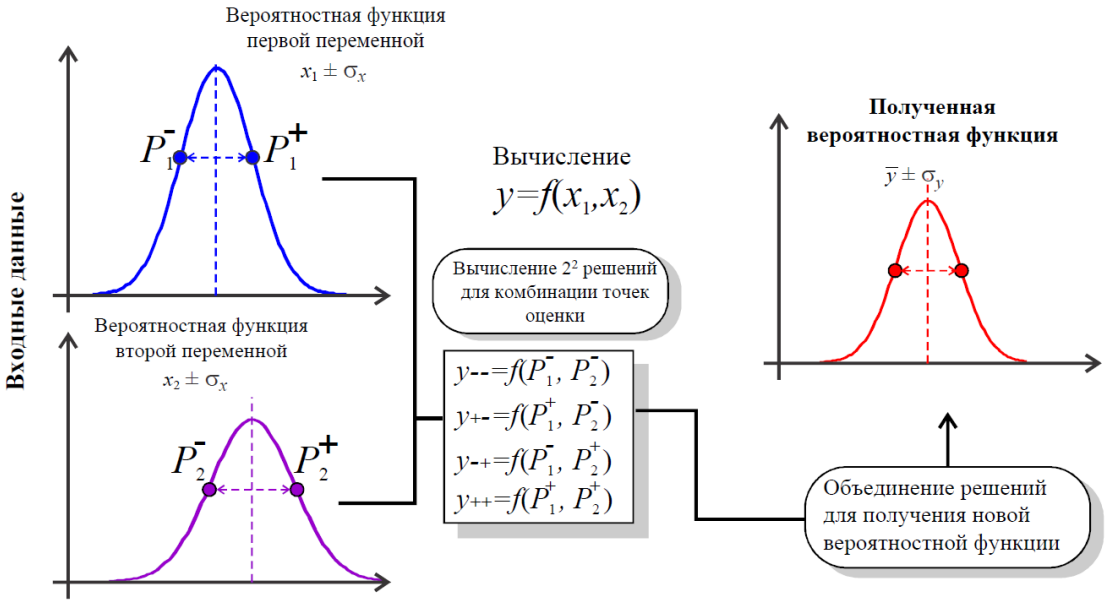


Рисунок 37. Иллюстрация принципа вычисления вероятностной функции с использованием метода точечной оценки (с двумя входными переменными)

Когда моделирование включает в себя изменение поведения материалов, например, в случае оттаивания грунтов, на метод точечной оценки накладываются дополнительные ограничения. По этой причине рекомендуется тестировать влияние ограниченного числа случайных величин одновременно.

Резюмируя вышесказанное, использование метода точечной оценки имеет следующие ограничения [142]:

- Метод применим для анализа надежности и анализа изменчивости, но не моделирования неоднородности.
- Фундаментальное предположение использования метода заключается в нормальном распределении случайных величин.
- Рекомендуется использовать ограниченное количество случайных величин и оценивать их влияние на результаты.
- В дополнение рекомендуется проводить анализ при экстремальных случайных значениях (±2σ или ±3σ).

В настоящий момент метод точечной оценки используется при оценке устойчивости склонов, устойчивости горных выработок, расчете осадок сооружений и других задач как в России, так и зарубежом [56; 60; 66; 121; 197]. Возможность использования данного метода для оценки надежности объектов строительства также отражена в американском нормативном документе Engineer Technical Letter 1110-2-547 [143]. В работе Li J. и др. продемонстрировано применение метода точечной оценки для определения эффективности разработки месторождений полезных ископаемых [173].

5.4 Стохастический подход к определению глубины оттаивания магистрального нефтепровода

Описание объекта

В данном разделе описывается предлагаемая методика стохастического подхода к теплофизическому моделированию путем использования метода точечной оценки. Некоторые положения этой методики ранее были продемонстрированы автором в работе [70]. В качестве объекта для апробирования был выбран участок проектируемого напорного нефтепровода от Сузунского до Ванкорского месторождения протяженностью 35 км. Используемые в работе материалы предоставлены научным руководителем – д.г.-м.н. И.К. Фоменко.

Административно рассматриваемый участок расположен в Таймырском (Долгано-Ненецком) муниципальный районе Красноярского края (Рисунок 38). Сведения об объекте исследования приведены по результатам проведенных инженерно-геокриологических изысканий, а также литературных источников [35; 62].



Рисунок 38 – Местоположение исследуемого объекта

Климат

Исследуемая площадь находится в переходной зоне между субарктическим Атлантическим сектором и умеренным Атлантико-Арктическим поясом, что определяет континентальный характер климата с преобладанием циклонов, поступающих с акваторий Баренцева и Карского морей, а также из Северной Атлантики. Температурный режим территории отличается суровыми условиями: многолетняя среднегодовая температура воздуха достигает – 9,5 °С, холодный период продолжается 244 дня (около 8 месяцев), а тёплый – 121 день. Наиболее

экстремальные условия наблюдаются в январе со среднемесячной температурой –28,0 °С. Средняя температура в июле температура составляет 14,2 °С.

Формирование снежного покрова начинается в последней декаде сентября, а устойчивый покров устанавливается в первых числах октября. Интенсивное таяние снежного покрова приходится на вторую декаду июня, а полное его исчезновение наблюдается к середине месяца. Число дней со снежным покровом в среднем составляет 262 дня. Многолетние наблюдения показывают, что средняя высота снежного покрова составляет 88 см (абсолютный максимум – 135 см). Наибольшая плотность снега фиксируется в третьей декаде мая, достигая в среднем 0,32 г/см^3 (максимальное зафиксированное значение 0,63 г/см^3).

Гидрография

Речная сеть района изысканий густая и разветвленная. Реки типично равнинные со слабовыраженными заболоченными долинами, плоскими, часто заболоченными водоразделами с наличием зарастающих стариц и озер. Обилие озер и болот на плоских водоразделах обусловлено слабым дренажем.

Основной водной артерией района является р. Большая Хета с многочисленными притоками (крупными р. Соленая, р. Ячинда и др. и мелкими ручьями без названия). Река Большая Хета является левым притоком р. Енисей. На рассматриваемой территории отмечается множество небольших мелководных озер ледниково-аккумулятивного, термокарстового, и водно-эрозионного генезиса.

Растительность, почвенный покров

Рассматриваемы район расположен в зоне тундры и лесотундры. Растительный покров территории включает древесный ярус из лиственницы и ели, подлесок из карликовой берёзы и кустарников, а также мохово-лишайниковый покров. Пространственное распределение растительности подчинено рельефу: на дренированных возвышенных участках сформированы лиственнично-еловые леса, в долинных комплексах рек и ручьев преобладают кустарниковые ивы и ольха. Напочвенный покров повсеместно представлен мхами и лишайниками.

Почвенный покров характеризуется широким распространением: арктических и тундровых; таежных и лесных почв; почвами болот и речных пойм.

Часть рассматриваемого района занята бугристыми болотами с верховым типом торфа, мощность от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров.

Рельеф

Исследуемый район расположен в северо-восточной части Западно-Сибирской равнины, граничащей со Средне-Сибирским плоскогорьем на левобережье р. Енисей. Рельеф обусловлен развитием ледникового и аллювиального комплексов и представляет собой плоскую заболоченную равнину. Поверхность равнины холмисто-западинного типа, осложненная

денудационно-аккумулятивными и эрозионно-аккумулятивными формами рельефа. Положение территории в северных широтах, в области распространения материковых оледенений, и в зоне многолетней мерзлоты определяют основные физико-географические особенности.

В истории формирования рельефа данной территории и его строении основную роль сыграли холодные периоды оледенений, интенсивные неотектонические движения и ледниково-морская аккумуляция.

Рельеф может быть охарактеризован как равнинный (возвышенных равнин). Гипсометрические отметки территории водосбора р. Большая Хета в районе трассы проектируемого объекта составляют от 60–95 м на водоразделах до 12–25 м в долинах рек. Территория равнины подвергалась неоднократному оледенению (демьяновское, самаровское, енисейское, зырянское).

Геоморфологические условия

По схеме геоморфологического районирования Западно-Сибирской низменности район проектирования относится к области моренных и водно-ледниковых приподнятых волнистых равнин.

Поверхность рассматриваемой территории представлена тремя типами рельефа:

- аккумулятивно-денудационным;
- денудационно-эрозионным;
- эрозионно-аккумулятивным.

В геоморфологическом отношении территория представляет собой аккумулятивно-денудационно-эрозионную возвышенную равнину ледникового и водно-ледникового генезиса, густо расчлененную многочисленными долинами рек и ручьев, осложненную конечно-ледниковыми и мерзлотными формами рельефа.

В геоморфологическом строении выделяются следующие формы рельефа:

- водораздельные поверхности высокого (70–110 м над уровнем моря) уровня и (моренная равнина) относительно слабо расчлененные, с гривисто-ложбинным рельефом, сложены преимущественно ледниковыми глинами и суглинками. Для поверхности характерно небольшое количество озер и болот, мелкие замкнутые низины и широкие полосы стока с небольшой глубиной вреза;
- широкие плоские и слабонаклонные водораздельные поверхности среднего (50–60 м над уровнем моря) и относительно высокого (70–80 м над уровнем моря) уровня (флювиогляциальная террасированная равнина), с волнисто-грядовым и холмисто-западинным рельефом на придолинных склонах, сложенных преимущественно водно-ледниковыми и озерно-ледниковыми отложениями различного механического состава, частично перекрытыми современными озерно-болотными отложениями, со средним и сильным эрозионным

расчленением. Водоразделы поверхности осложнены останцами размытых моренных гряд и холмов (высотой до 90 м над уровнем моря);

- конечные моренные гряды (высотой до 90 м над уровнем моря) с мелкохолмисто-западинным и мелкогрядово-ложбинным рельефом, сложенные валунными суглинками с пластами подземных льдов, с обилием мелких бессточных озер и неглубоких разветвленных ложбин стока;

Геологическое строение

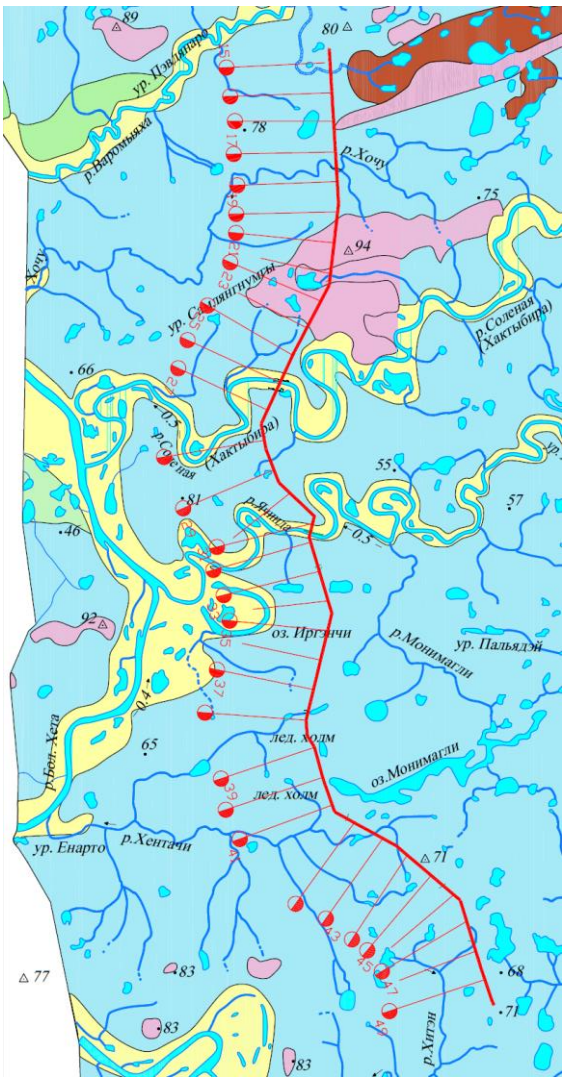
Территория изысканий расположена на границе западного окончания Сибирской платформы и восточного окончания Западно-Сибирской плиты, в строении которой участвуют мезо-кайнозойские отложения с относительно постоянным литологическим составом в разрезе на всей площади структуры. Основу геологического разреза осадочного чехла составляют юрские и меловые отложения. В разрезе юрских отложений преобладают песчано-глинистые и песчано-галечные разности. Состав меловых отложений довольно разнообразен, большая часть разреза представлена прибрежно-морскими отложениями.

Осадочные плиоцен-четвертичные отложения, развитые на исследуемой территории представлены нерасчленным комплексом морских, ледниково-морских и водно-ледниковых отложений верхнеплейстоценового возраста (m,gm,fgQ_{III}), верхнеплейстоценовыми – голоценовыми отложениями аллювиального генезиса (aQ_{III-IV}) и болотными (bQ_{IV}) отложениями голоценового возраста (Рисунок 39).

Верхнеплейстоценовые морские, ледниково-морские и флювиогляциальные отложения (m,gm,fgQ_{III}), слагают наиболее высокие водораздельные поверхности и являются рельефообразующими. Состав грунтов преимущественно суглинистый, с включениями гравия, гальки и валунов, с линзами супесей, песков от пылеватых до мелких. Склоны водоразделов сложены суглинисто-супесчаными отложениями с невыдержанными по разрезу прослоями песков мелких, пылеватых и гравийно-галечниковых грунтов.

Верхнеплейстоценовые отложения речных террас (aQ_{III}) представлены преимущественно супесчаными и песчаными грунтами различной крупности, реже суглинистыми грунтами, мощностью до 5–10 м. Современные пойменные отложения (aQ_{IV}) представлены песками мелко-среднезернистыми и имеют мощность до нескольких метров.

Современные болотные отложения (bQ_{IV}) представлены комплексными видами торфа мощностью до нескольких метров. На территории встречены болота преимущественно верхового типа. Болота преимущественно мерзлые, с талыми мочажинами.



Условные обозначения

aH	*Аллювиальные образования поймы. Пески, суглинка, супеси*
pIH	*Палюстринные (озерно-болотные) суглинки, илы,торф (до 3м)*
la2IIIkr	*Каргинский горизонт. Озерно-аллювиальные (вторая терраса) суглинки, супеси, пески*
la3IIIer	*Ермаковский горизонт. Озерно-аллювиальные (третья терраса) супеси, суглинки, в основании пески*
mIIIkz	*Казанцевский горизонт. Морские, прибрежно-морские пески, галечники, суглинки, супеси*
m,gmII	*Нерасчлиненные морские и ледово-морские пески с гравием, галькой и валунами; суглинки*

Прочие обозначения

Озера

Реки и ручьи

△ 80 *Пункты государственной геодезической сети*

Проектируемая трасса нефтепровода, ее километраж

15

Рисунок 39 – Фрагмент карты четвертичных отложений масштаба 1:200 000

Гидрогеологические условия

Гидрогеологическая обстановка объекта определяется практически сплошным развитием мощных мерзлых толщ. Наиболее крупные запасы воды сосредоточены в подозерных и подрусловых таликах и в надмерзлотных водах сезонноталого слоя.

В гидрогеологическом отношении на исследуемом участке проектируемой трассы магистрального нефтепровода выделяется два водоносных горизонта, различающиеся по своим гидродинамическим и гидрогеохимическим особенностям:

- слабопроницаемый (слабоводоносный) средне- и верхнечетвертичный комплекс озерно-аллювиальных и ледниково-морских отложений несквозных и сквозных таликов;
- подземные воды органических (болотных) отложений.

Грунтовые воды в болотных отложениях формируются исключительно в пределах заболоченных территорий, водовмещающими грунтами являются торфа. Данный водоносный горизонт характеризуется отсутствием напора, небольшой мощностью и прерывистым распространением в плане. Основным источником питания служит инфильтрация атмосферных осадков с дневной поверхности.

Надмерзлотные воды подрусловых несквозных таликов развиты преимущественно под долинами и руслами рек, глубиной более 1,5–2,0 м. Мощность подрусловых таликов составляет более 3 м. Водоносный горизонт приурочен к современным аллювиальным отложениям, включающим мелкозернистые и пылеватые пески, а также глинистые грунты с включениями линз песков. Для надмерзлотных вод несквозных подрусловых таликов характерен безнапорный режим фильтрации. Источником их питания служит инфильтрация как поверхностного стока, так и атмосферных осадков. По гидрохимическим показателям воды относятся к гидрокарбонатному классу (натриевому и кальциево-магниевому составу), имеют кислую реакцию среды и общую минерализацию в пределах 1 г/л. Подземные воды подрусловых таликов и поверхностные воды находятся в тесном гидродинамическом взаимодействии, образуя единую гидрогеологическую систему.

Геокриологические условия

Рассматриваемая территория входит в Таз-Хетско-Енисейскую геокриологическую область Северной зоны континентального региона и характеризуется мощной толщей многолетнемерзлых грунтов. Исследуемая территория располагается в зоне сплошного распространения ММГ.

Мощность ММГ в пределах наиболее древних морских равнин измеряется несколькими сотнями метров (до 450–480 м), под крупными реками и озерами она уменьшается до 280–300 м.

Верхняя часть разреза многолетнемерзлых грунтов представлена в основном синкриогенными льдистыми и сильнольдистыми грунтами слоистой текстуры. С глубиной льдистость грунтов уменьшается, текстура переходит преимущественно в массивную.

Толща мерзлых грунтов залегает непосредственно под сезонноталым слоем, либо граничит с надмерзлотными таликами, имеющими прерывистое локальное распространение.

Большую роль в распространении ММГ на территории играет снежный покров. В большинстве отрицательных формах рельефа, в которых зимой накапливается мощный снежный покров, наблюдаются надмерзлотные таликовые участки. Мощность таликов зависит от степени выраженности понижения в рельефе. При этом большинство таликов являются несквозными, и относятся к инфильтрационному типу. Мощность их, как правило, не превышает 5 м.

Для зоны сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов характерна температура на подошве слоя годовых колебаний от минус 1°С до минус 5°С Глубина нулевых годовых колебаний составляет от 7 м до 9 м. Преобладают преимущественно эпигенетически сформировавшиеся ММГ.

Комплекс голоценовых органических грунтов представлен торфами порфировидной и слоисто-сетчатой криотекстуры, очень сильнольнольдистые. В интервале глубин от 0,6 до 3,6 м непосредственно под торфом вскрыты линзы сегрегационного льда, провоцирующие процессы термокарста и бугров пучения.

Верхнеплейстоценовые морские, ледниково-морские и флювиогляциальные отложения (m,gm,fgQ_{III}) представлены суглинками легкими песчанистыми, с включениями гравия, гальки и валунов, с прослоями и отдельными линзами супесей песчанистых, песков пылеватых, гравийно-галечниковыми грунтами. В верхней части разреза преобладают суглинки сильнольдистые с прослоями очень сильнольдистых и льдистые. С глубиной отмечается снижение льдистости до слабольдистых.

Криогенная текстура суглинков и супесей – слоистая и слоисто-сетчатая, песков – массивная, крупнообломочных – корковая. Толщина шлиров и прожилков льда в среднем составляет 1–10 мм до 50 мм. Расстояние между ледяными прослойками от 3–5 мм до 5–10 см и более. На отдельных участках в толще суглинистых отложений встречены прослои льда 20–25 см. Песчаные грунты характеризуются низкой степенью льдистости.

Геологические и инженерно-геологические и криогенные процессы

Комплекс экзогенно-геологических процессов района изысканий включает криогенные процессы, эрозионную деятельность и процесс заболачивания.

Термокарстовые процессы сопровождаются просадками грунта из-за вытаивания линз льда и сильнольдистых глинистых грунтов, в результате чего формируются отрицательные

формы рельефа (часто заполненные водой). Активизация термокарста связана в рассматриваемом районе прежде всего связана с техногенным воздействием.

Активизация термоэрозионных процессов (образование рытвин, промоин и оврагов) временными водотоками детерминирована близостью базиса эрозии, разреженным растительным покровом (менее 0,1 м) и повсеместной распространенностью высокольдистых мерзлых толщ. Дополнительным фактором оврагообразования служит ежегодное морозное растрескивание кровли ММГ в осенне-зимний период.

Заболачивание территории обусловлено избыточным увлажнением и низкой испаряемостью. Процесс заболачивания развит в пределах торфяно-болотных систем глубиной от 0,3 до 3,8 м. По периферии торфяников распространены заболоченные участки с минеральными грунтами либо с торфами мощностью до 0,3 м.

В инженерно-геологическом отношении среди форм морозного пучения наиболее значимо площадное пучение. Площадное пучение относится к участкам с неустойчивым температурным режимом грунтов, испытывающим частичное вытаивание, размерзание блоков.

Выделение типовых расчетных участков

Для дальнейших расчетов были определены три типовых участка, которые наилучшим образом отражают различия в инженерно-геокриологических условиях рассматриваемого отрезка трассы нефтепровода:

1. Участок речной террасы (р. Соленая).
2. Участок распространения верховых болот.
3. Участок ледниковой равнины с распространенными сильнольдистыми грунтами.

Фрагменты карты инженерно-геологических условий и карты геокриологического районирования для каждого типового участка приведены на Рисунках 40–47.

В соответствие с установленными инженерно-геокриологическими условиями трассы нефтепровода, были построены численные модели по поперечным профилям для каждого выбранного типового участка:

- для участка речной террасы модель подготовлена по скважине №101;
- на участке верхового болота модель подготовлена по скважине №179;
- на участке ледниковой равнины с сильнольдистыми грунтами модель подготовлена по скважине №183.

Инженерно-геологические разрезы типовых участков и описание выделенных при изысканиях ИГЭ приведено на Рисунках 48–50. Основные физические свойства ИГЭ приведены в Таблице 20.

Распространение и температура многолетнемерзлых пород (ММП)	Распространение ММП, %	Температура ММП, С	Геоморфологические уровни														
			Ледниковые и водно-ледниковые равнины														
			ГРУНТЫ														
			песчаные	песчаные и глинистые, переслаивание	глинистые	ТОРФ											
						мощность < 2м											
						распространение торфа по площади											
						сплошное					несплошное от 9% до 18%						
						подстилаемые грунты											
						песчаные		глинистые		переслаивание	песчаные		глинистые				
			ЛЬДИСТОСТЬ														
			сл	л	л	сл	л	осл	сл	л	л	л	сл	л	сл	л	осл
	2	>0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	98	-1.0--3.5	-	-	-	30			-	-	-	-	-	-	-		-
	98	-3.0--3.5	-	-	-		20-25		-	-	-	-	-	-		$\frac{20}{20}$	
	98	-3.0--4.1	-	-	-			45-50	-	-	-	-	-	-			$\frac{80}{80}$

Примечание: сл-стабольдистые грунты: глинистые i < 20
л-льдистые грунты: глинистые 20 < i < 40
осл-очень сильнольдистые грунты: глинистые 60 < i < 90

Рисунок 40 – Таксонометрическая таблица к картам геокриологического районирования

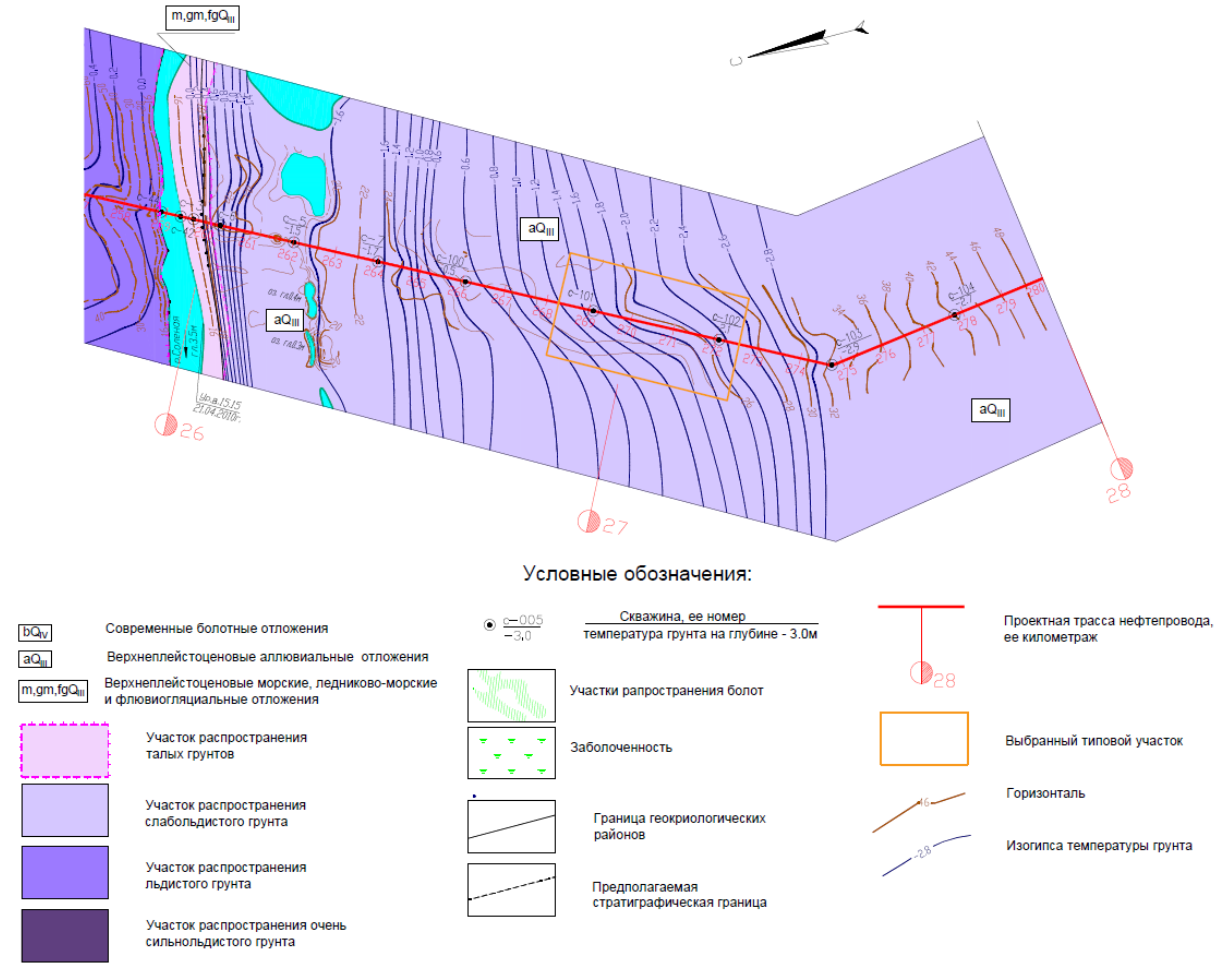


Рисунок 41 – Фрагмент карты геокриологического районирования масштаба 1:10 000 типового участка №1 (речная терраса)

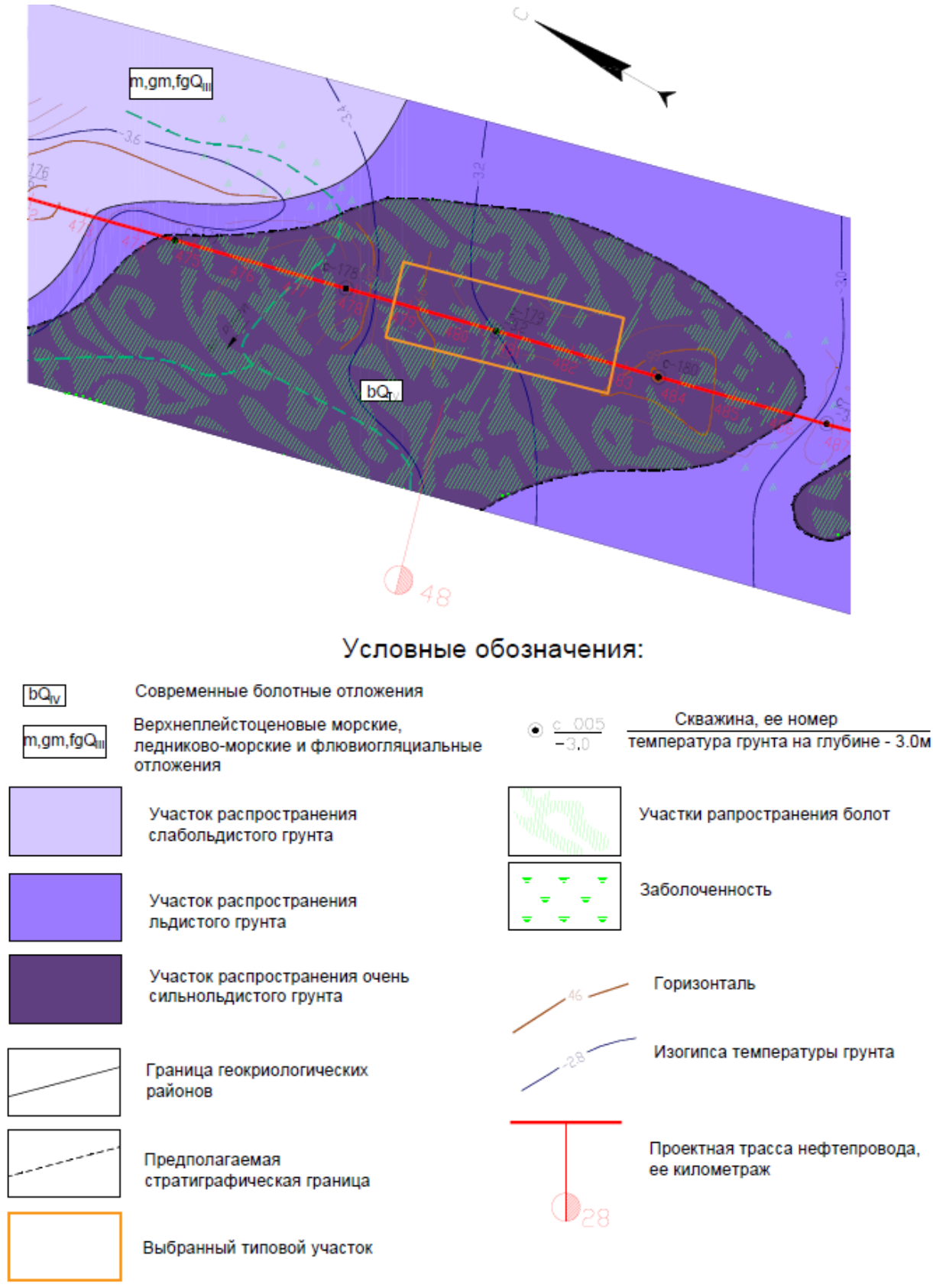


Рисунок 42 – Фрагмент карты геокриологического районирования масштаба 1:10 000 типового участка №2 (верховое болото)

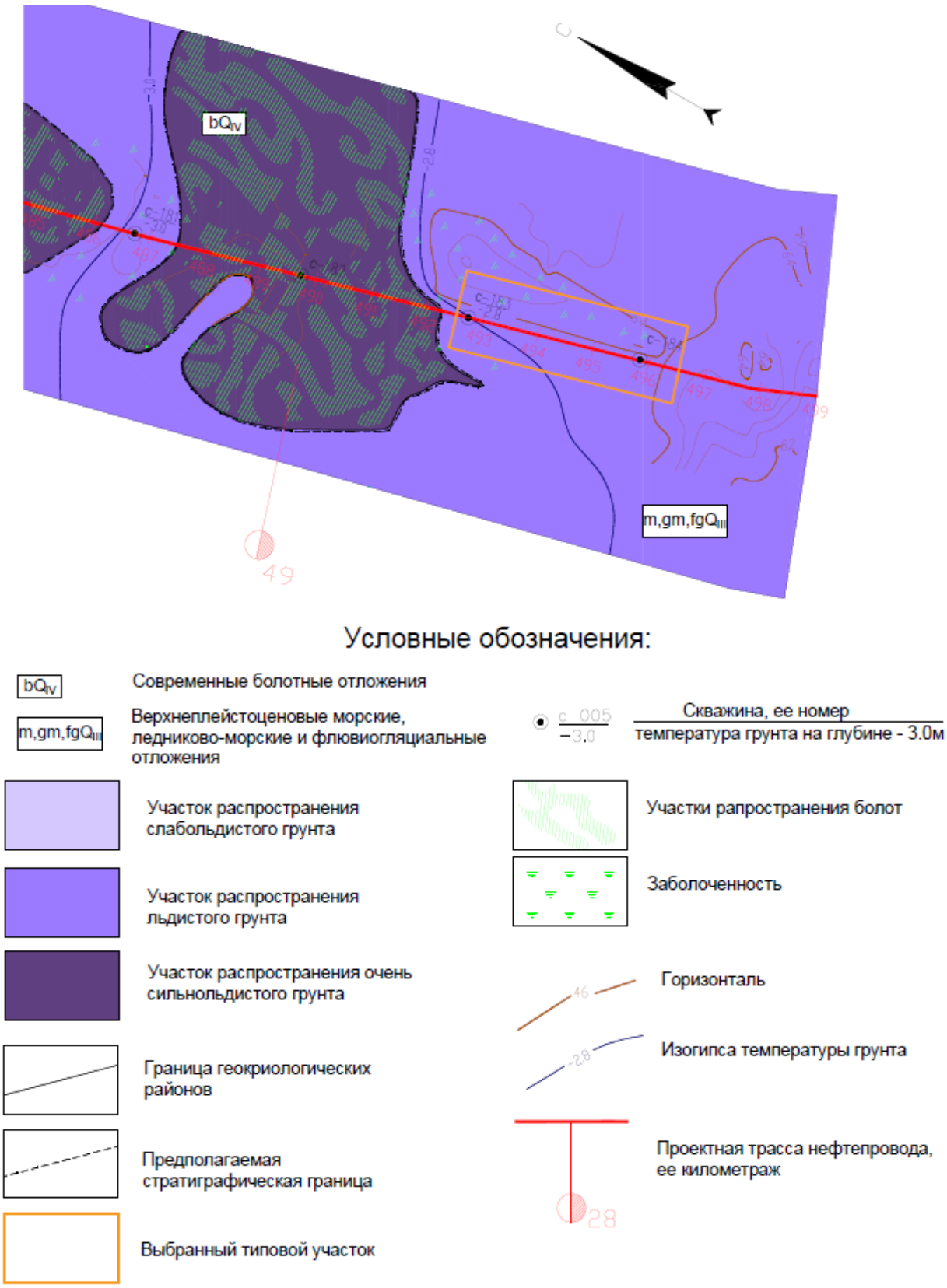


Рисунок 43 – Фрагмент карты геокриологического районирования масштаба 1:10 000 типового участка №3 (ледниковая равнина с распространенными сильнольдистыми грунтами)

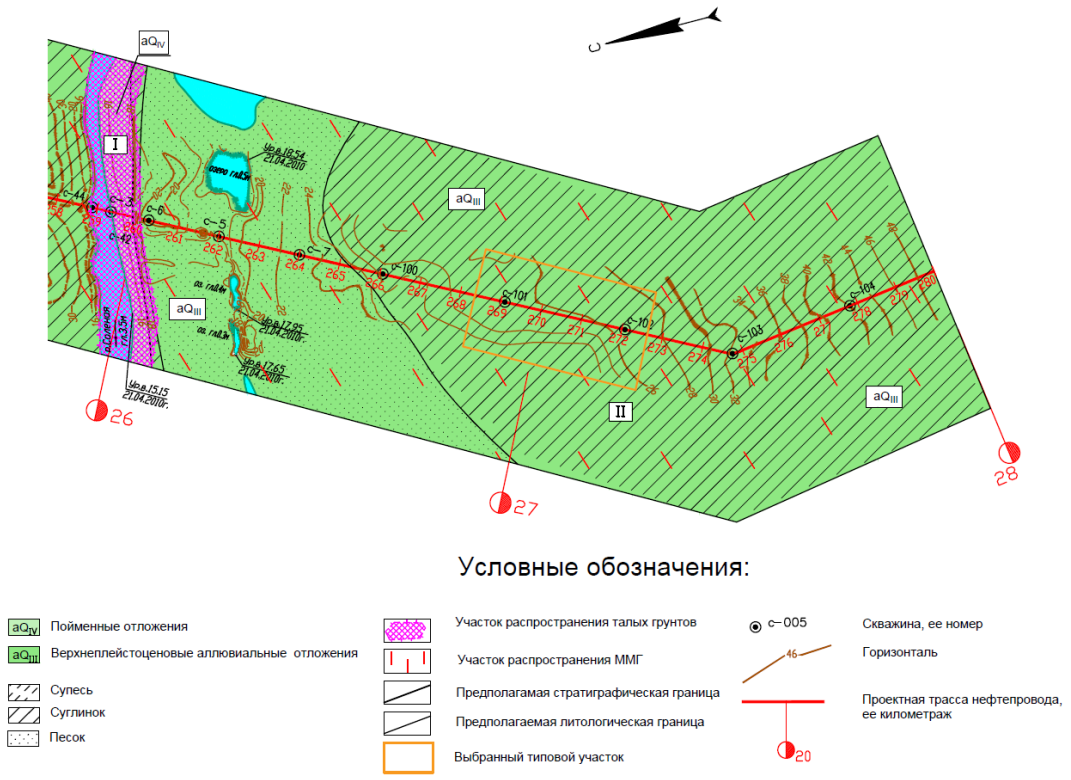


Рисунок 44 – Фрагмент карты инженерно-геологических условий масштаба 1:10 000 типового участка №1 (речная терраса)

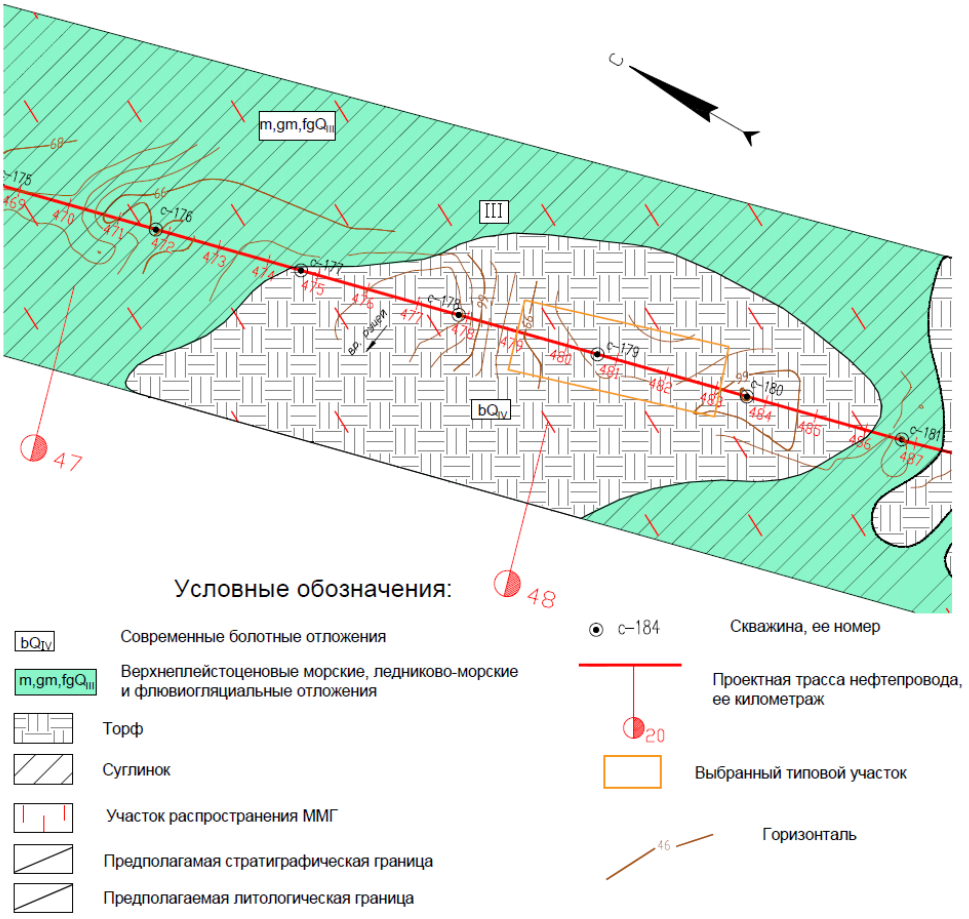


Рисунок 45 – Фрагмент карты инженерно-геологических условий масштаба 1:10 000 типового участка №2 (верховое болото)

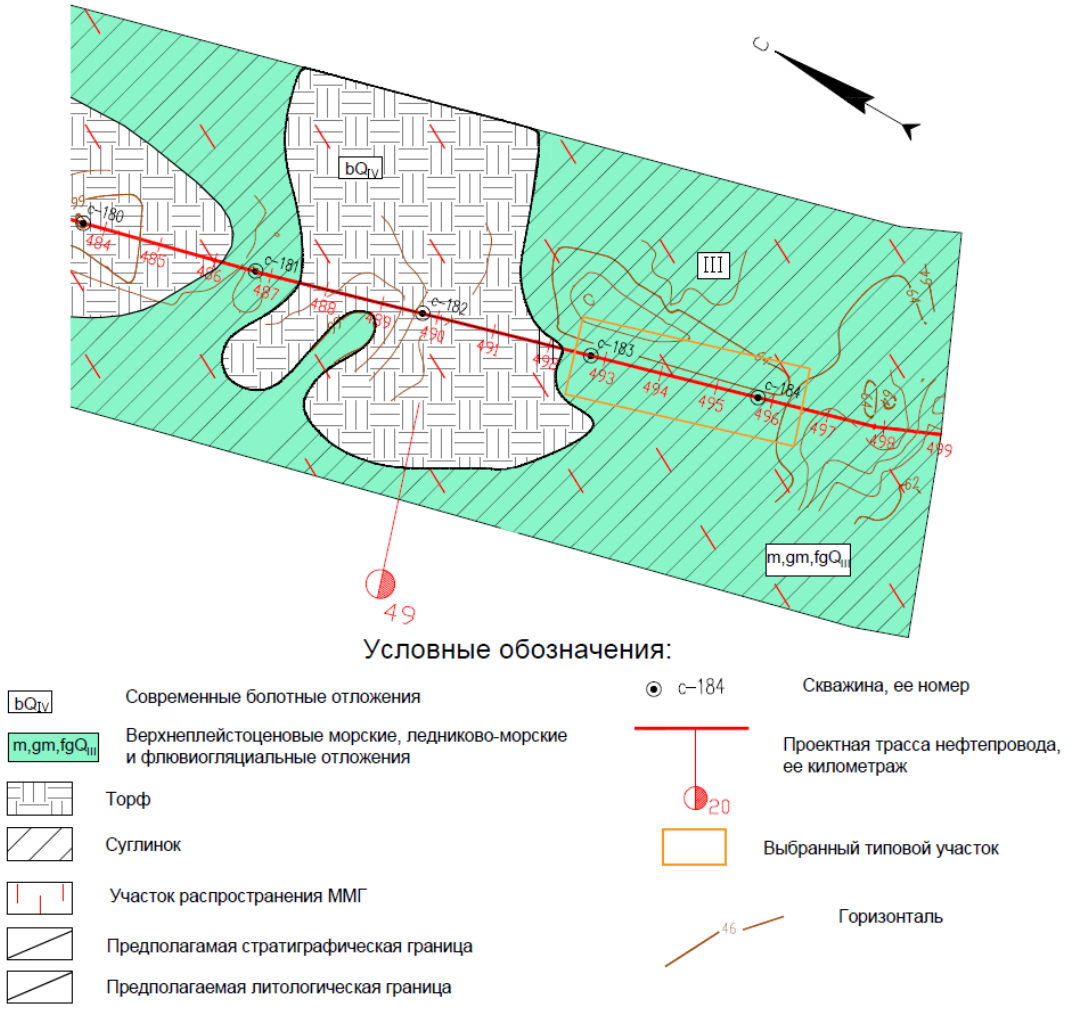


Рисунок 46 – Фрагмент карты инженерно-геологических условий масштаба 1:10 000 типового участка №3 (ледниковая равнина с распространенными сильнольдистыми грунтами)

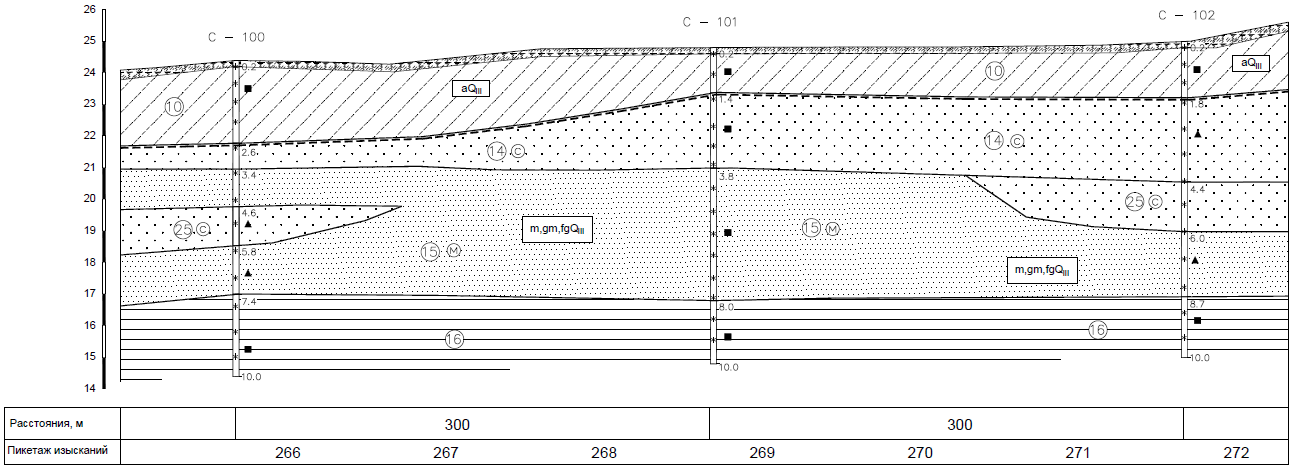
Область	Провинция	Район	Класс	Подкласс	Характеристика участков	
Урало-Енисейская лесотундровая ландшафтная область	Нижнетазовская возвышенная лесотундровая ландшафтная	Луцаяхский	Равнинный		дренированные и относительно дренированные	переувлажненные
				I – Пойма рек	пойменные	болотные
					a Q_{IV}	b Q_{IV}
				II – Верхнеплейстоценовая аллювиальная равнина	аллювиальные	
					возвышенные / низинные	
					a Q_{III}	
				III – Верхнеплейстоценовая моренная и водно-ледниковая равнина	Морские, ледниково-морские, флювиогляциальные	
					возвышенные / низинные	
					m,qm,fq Q_{III}	

Рисунок 47 – Таксонометрическая схема к картам инженерно-геологических условий

Таблица 20 – Основные физические характеристики ИГЭ на типовых участках

Наименование показателей		Индекс	Ед. измер.	Биогенные отложения	Аллювиальн. отложения	Морские, ледниково-морские, флювиогляциальные отложения								
				ИГЭ-1	**ИГЭ-10**	**ИГЭ-2**	**ИГЭ-3**	**ИГЭ-4**	**ИГЭ-5**	**ИГЭ-8**	**ИГЭ-9**	**ИГЭ-14**	**ИГЭ-15**	**ИГЭ-16**
Влажность:	за счет ледяных включений	Wi	д.е.	8,85	0,07	0.09	0,26	0,09	0,08	0,04	0,05	0	0	0,12
	за счет порового льда	Wic	д.е.	2,7	0,11	0,14	0,13	0,14	0,09	0,09	0,08	0,19	0,21	0,13
	за счет незамерзшей воды	Ww	д.е.	0	0,10	0,12	0,17	0,08	0,16	0,11	0,15	0,02	0,03	0,21
	грунта между ледяных вкл.	Wm	д.е.	2,70	0,21	0,26	0,18	0,22	0,25	0,20	0,23	0,20	0,24	0,34
	суммарная	Wtot	д.е.	11,55	0,28	0,35	0,30	0,30	0,33	0,24	0,28	0,20	0,24	0,46
Плотность	частиц грунта	ρs	г/см^3	1,27	2,70	2,71	2,69	2,69	2,70	2,70	2,71	2,66	2,66	2,74
	грунта в естеств. состоянии	ρf	г/см^3	0,97	2,05	1,79	1,69	1,91	1,91	1,96	1,90	1,90	1,96	1,71
	грунта в сухом состоянии	ρd	г/см^3	0,1	1,60	1,33	1,49	1,47	1,44	1,58	1,48	1,58	1,58	1,17
Коэффициент пористости		e	д.е.	11,9	0,69	1,04	0,99	0,83	0,88	0,71	0,83	0,68	0,68	1,34
Влажность грунта на границе раскатывания		Wp	д.е.	-	0,15	0,26	0,22	0,16	0,19	0,17	0,180	-	-	0,30
Число пластичности		Ip	д.е.	-	0,05	0,15	0,11	0,05	0,10	0,09	0,10	-	-	0,21
Льдистость:	за счет лед. включений	Ii	д.е.	0,69	0,10	0,13	0,24	0,24	0,09	0,08	0,07	0	0	0,04
	за счет порового льда	Iic	д.е.	0,25	0,15	0,16	0,15	0,19	0,13	0,15	0,17	0,35	0,35	0,15
	суммарная	Itot	д.е.	0,94	0,25	0,29	0,39	0,43	0,22	0,23	0,19	0,35	0,35	0,19
Степень заполн. пор грунта льдом и незмер. вод.		Sr	д.е.	0,23	1	0,60	0,60	0,97	0,83	0,66	0,81	0,84	0,94	0,82
Потери при прокаливании		Iot	д.е.	0,88	0,036	0,044	0,046	0,034	0,038	0,044	0,041	-	-	0,084
Засоленность		Dsal	%	0,073	0,133	0,057	0,08	0,07	0,10	0,075	0,06	0,043	0,04	0,12

Инженерно-геологический разрез типового участка №1
(речная терраса)



Условные обозначения

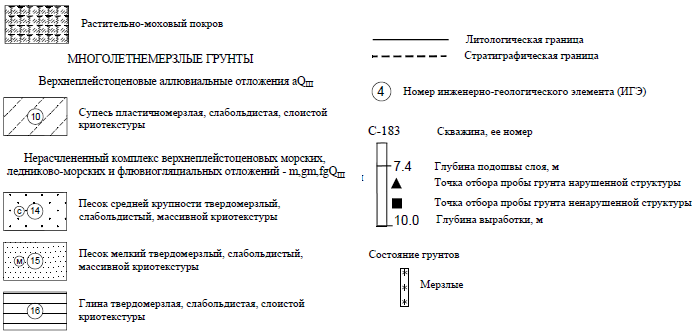
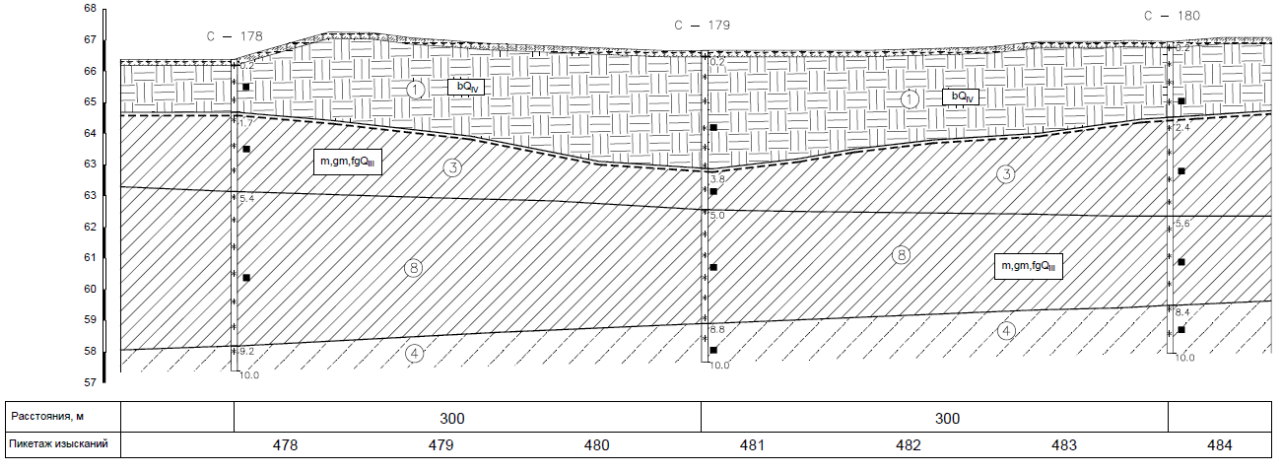


Рисунок 48 – Схематический инженерно-геологический разрез типового участка №1

Инженерно-геологический разрез типового участка №2
(верховое болото)



Условные обозначения

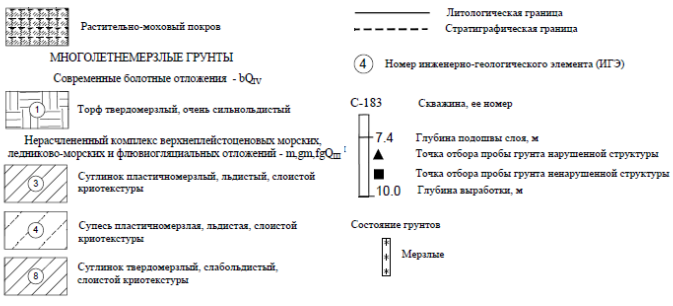


Рисунок 49 – Схематический инженерно-геологический разрез типового участка №2

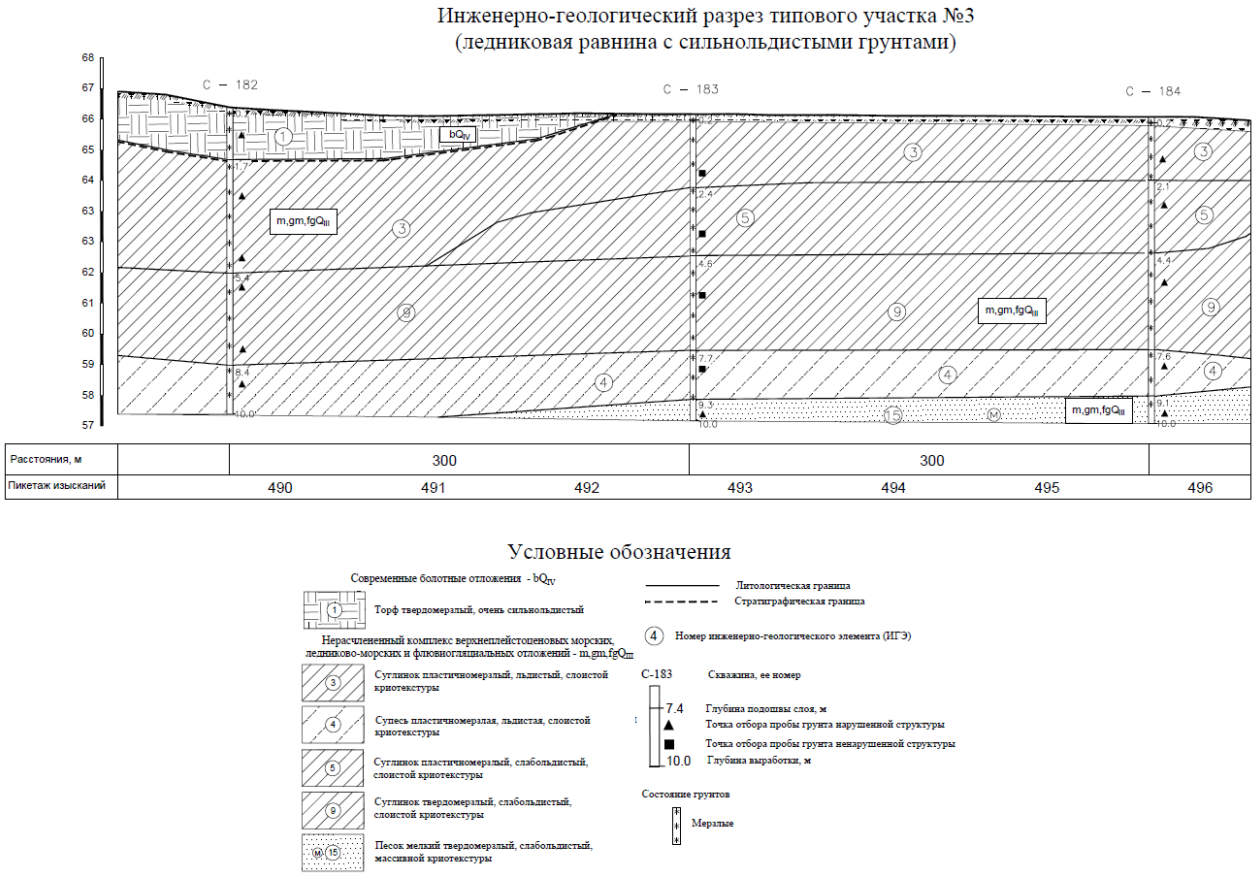


Рисунок 50 – Схематический инженерно-геологический разрез типового участка №3

Методика теплофизических расчетов

Расчет глубины оттаивания грунтов от теплового воздействия горячего нефтепровода произведен с помощью программного обеспечения Temp/W GeoStudio.

Для верхнего ГУ на поверхности грунта было задано условие теплообмена III рода с учетом среднемесячных температур воздуха по данным метеостанции Потапово (Таблица 21), при помощи ранее описанной методики n-фактора.

Таблица 21 – Основные климатические данные (метеостанция Потапово)

Характеристика	Месяцы												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Средняя месячная и годовая температура воздуха, °С	–28,0	–27,2	–21,0	–14,1	–4,7	6,9	14,2	11,0	4,1	–8,0	–21,1	–25,5	–9,5
Средняя месячная и годовая скорость ветра, м/с	4,1	3,8	3,5	3,6	3,8	3,9	3,5	3,4	3,7	3,9	3,5	4,1	3,7
Средняя высота снежного покрова (на конец месяца), см	52	59	67	69	0	0	0	0	0	20	38	46	–

Начальное температурное состояние в моделях был задано на основании данных замеров в термометрических скважинах, выполненных до глубины нулевых годовых колебаний (10 м) на

начало апреля. Распределение температур в скважинах на выбранных расчетных участках показано на Рисунках 51–53.

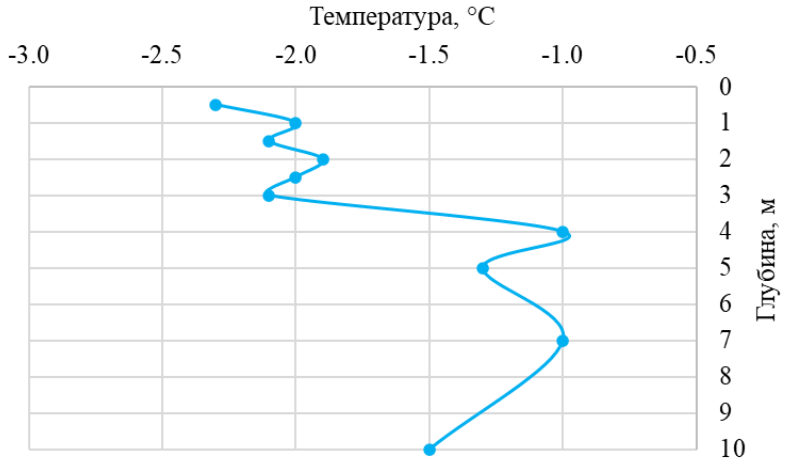


Рисунок 51 – Распределение температур в скважине №101 на участке речной террасы

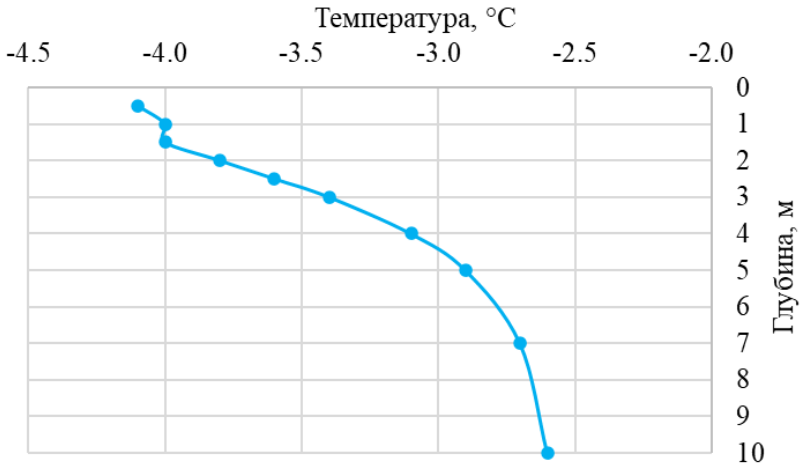


Рисунок 52 – Распределение температур в скважине №179 на участке верхового болота

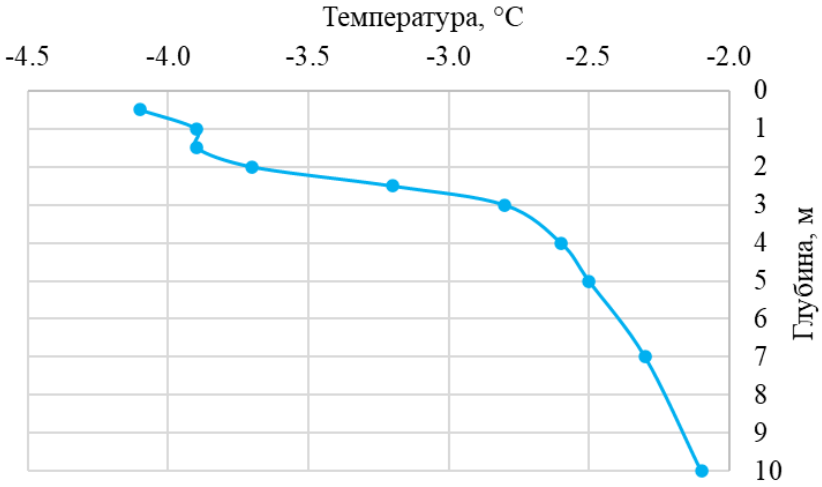


Рисунок 53 – Распределение температур в скважине №183 на участке ледниковой равнины с сильнольдистыми грунтами

Для каждого ИГЭ были использованы теплофизические свойства, определенные в лабораторных условиях (Таблица 22).

Таблица 22 – Теплофизические свойства грунтов принятые в расчетах

№ ИГЭ	Теплопроводность талого грунта λ_{th}, Вт/(м·°С)	Теплопроводность мерзлого грунта λ_f, Вт/(м·°С)	Теплоемкость талого грунта C_{th}, кДж/(м^3·°С)	Теплоемкость мерзлого грунта C_f, кДж/(м^3·°С)	Объемная влажность W_{tot}, д.е.	Температура замерзания/оттаивания T_{bf}, °С
Обратная засыпка	2,10	2,50	2600	1800	0,35	–0,1
ИГЭ-1	0,76	1,24	3810	2220	0,98	0
ИГЭ-3	1,57	1,72	2430	2330	0,45	–0,3
ИГЭ-4	1,83	1,92	2430	2330	0,44	–0,2
ИГЭ-5	1,57	1,66	3350	2350	0,48	–0,4
ИГЭ-8	1,45	1,55	3150	2350	0,37	–0,4
ИГЭ-9	1,40	1,62	3440	2200	0,40	–0,3
ИГЭ-10	1,84	1,95	2500	2400	0,45	–0,5
ИГЭ-14	2,15	2,37	2310	2140	0,32	–0,2
ИГЭ-15	2,50	2,73	3150	2350	0,35	–0,2
ИГЭ-16	1,72	1,85	3260	2150	0,54	–0,5

Так как глубина исследованной толщи ММГ при изысканиях составила 10 м, в моделях было принято допущение, что ниже данной глубины температура является одинаковой (принята по наиболее глубокому температурному замеру), а последний вскрытый ИГЭ продолжается до нижней границы модели.

В качестве материала обратной засыпки был принят крупнозернистый песок, так как согласно требованиям, обратная засыпка траншеи нефтепровода должна быть выполнена с уплотнением из привозного песчано-гравелистого минерального грунта без примеси органических веществ [98].

При создании расчетных схем были приняты две конфигурации траншеи на основе проектной документации и данных об инженерно-геологических условиях. Параметры траншей на типовых участках №1,3 приведены на Рисунке 54. Так как на типовом участке №2 в основании нефтепровода залегают очень сильнольдистые торфа (ИГЭ-1), траншея выполнена с заменой грунта на всю их мощность – 3,8 м (Рисунок 55).

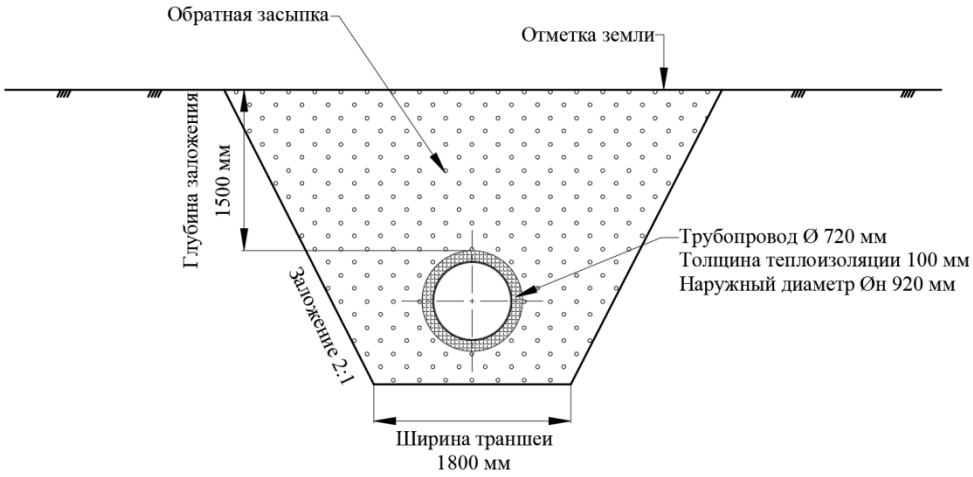


Рисунок 54 – Сечение траншеи при прокладке трубопровода на участках №1,3



Рисунок 55 – Сечение траншеи при прокладке трубопровода с заменой торфяных грунтов на участке №2

Тепловое воздействие нефтепровода на мерзлые грунты было задано условием теплообмена I рода. Температура перекачиваемой нефти равна 50°С в течении всего срока эксплуатации трубопровода. Толщина теплоизоляции равна 10 см.

Расчет осадки был выполнен для составляющей, обусловленной действием собственного веса оттаивающего грунта [96]:

$$S_{th} = \sum_{i=1}^{n} \left(A_{th,i} + m_{th,i} \cdot \sigma_{zg,i} \right) h_i \,, \tag{5.4}$$

где n – число слоев грунта, A_{th} – коэффициент оттаивания д.е., m_{th} – коэффициент сжимаемости кПа$^{-1}$, σ_{zg} – вертикальное напряжение от собственного веса грунта на середине выбранного слоя, кПа, h_i – мощность расчетного слоя грунта, м.

Используемые в расчете деформационные свойства грунтов приведены в Таблице 23.

Таблица 23 – Деформационные свойства грунтов в оттаявшем состоянии

№ ИГЭ	Коэффициент оттаивания А, д.е.	Коэффициент сжимаемости m_{th}, $МПа^{-1}$
ИГЭ-3	0,18	0,42
ИГЭ-4	0,047	0,19
ИГЭ-5	0,12	0,22
ИГЭ-8	0,10	0,12
ИГЭ-9	0,065	0,1
ИГЭ-14	0,04	0,04
ИГЭ-15	0,07	0,065
ИГЭ-16	0,055	0,11

По результатам проектных прочностных расчетов, допустимая осадка для данного нефтепровода должна составлять не более 50 см.

Расчет глубины оттаивания грунтов от воздействия горячего нефтепровода был произведен на срок службы сооружения – 30 лет.

Как ранее упоминалось во второй главе работы, существует оптимальная модельная область (в том числе глубина), при которой способ задания нижнего граничного условия не оказывает влияния на расчеты. Далее были выполнены расчеты для моделей с различными размерами расчетной области (по глубине и ширине), а на нижней границе были заданы два типа граничных условий (нулевой тепловой поток и постоянная отрицательная температура). Результаты расчетов приведены в Таблицах 24–26.

Таблица 24 – Результаты расчета величины оттаивания (от границы трубопровода) на участке речной террасы в зависимости от размеров модели и типа нижнего ГУ

Глубина модели, м	**Ширина модели, м**							
	20		**30**		**40**		**50**	
	Q=0	**T= –1,5°C**	**Q=0**	**T= –1,5°C**	**Q=0**	**T= –1,5°C**	**Q=0**	**T= –1,5°C**
10	*	4,5	*	4,4	*	4,4	*	4,4
15	7,1	6,3	6,9	6,1	6,8	5,9	6,8	5,9
20	6,9	6,5	6,6	6,2	6,5	6,3	6,5	6,3
25	6,7	6,6	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4
30	6,7	6,6	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4
Примечание: * граница оттаивания пересекает нижнюю границу модели								

Таблица 25 – Результаты расчета величины оттаивания (от границы трубопровода) на участке верхового болота в зависимости от размеров модели и типа нижнего ГУ

Глубина модели, м	**Ширина модели, м**							
	20		**30**		**40**		**50**	
	Q=0	**T= –2,7°C**	**Q=0**	**T= –2,7°C**	**Q=0**	**T= –2,7°C**	**Q=0**	**T= –2,7°C**
10	*	2,8	*	2,7	5,1	2,7	5,1	2,7
15	5,7	3,4	4,7	3,2	4,3	3,2	4,1	3,2
25	5,2	3,8	4,3	3,6	4,0	3,5	3,9	3,4
30	5,0	4,2	4,2	3,7	3,9	3,6	3,8	3,5
40	4,7	4,4	4,0	3,9	3,7	3,7	3,7	3,7
50	4,6	4,5	3,9	4,1	3,7	3,7	3,7	3,7
Примечание: * граница оттаивания пересекает нижнюю границу модели								

Таблица 26 – Результаты расчета величины оттаивания (от границы трубопровода) на участке ледниковой равнины с распространенными льдистыми грунтами в зависимости от размеров модели и типа нижнего ГУ

Глубина модели, м	**Ширина модели, м**							
	20		**30**		**40**		**50**	
	Q=0	**T= –2,1°C**	**Q=0**	**T= –2,1°C**	**Q=0**	**T= –2,1°C**	**Q=0**	**T= –2,1°C**
10	*	3,5	*	3,4	7,7	3,4	7,7	3,4
15	7,3	4,1	5,7	4,0	5,4	4,0	5,3	4,0
25	6,5	4,6	5,5	4,3	5,1	4,4	5,0	4,4
30	6,0	5	5,2	4,6	4,9	4,5	4,9	4,5
40	5,6	5,3	5,2	4,9	4,7	4,7	4,7	4,7
50	5,5	5,3	5,1	5,1	4,7	4,7	4,7	4,7
Примечание: * граница оттаивания пересекает нижнюю границу модели								

Таким образом, при определенном соотношении глубины и ширины модели различий из-за типа нижнего ГУ нет, и в данном случае для рассматриваемых участков определены следующие оптимальные размеры расчетной области:

1. Для участка №1 (речная терраса) – 30 м по ширине и 25 м по глубине.
2. Для участков №2 (верховое болото) и №3 (ледниковая равнина) оптимальные размеры расчетной области составляют 40 м по ширине и 40 м по глубине.

Для наглядности влияния способа задания нижнего граничного условия на результаты определения величины оттаивания, ниже приведены графики зависимости глубины оттаивания от глубины расчетной области модели при оптимальной ширине модели (Рисунки 56–58).

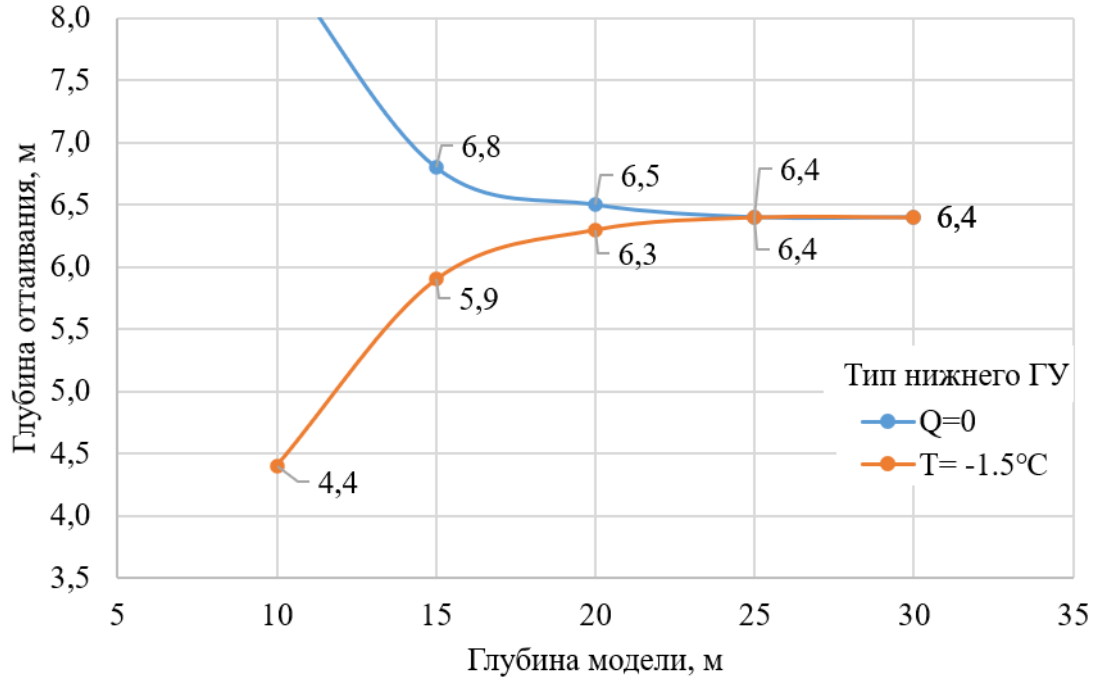


Рисунок 56 – Определение оптимальной модельной глубины для участка №1 при оптимальной ширине модели 30 м

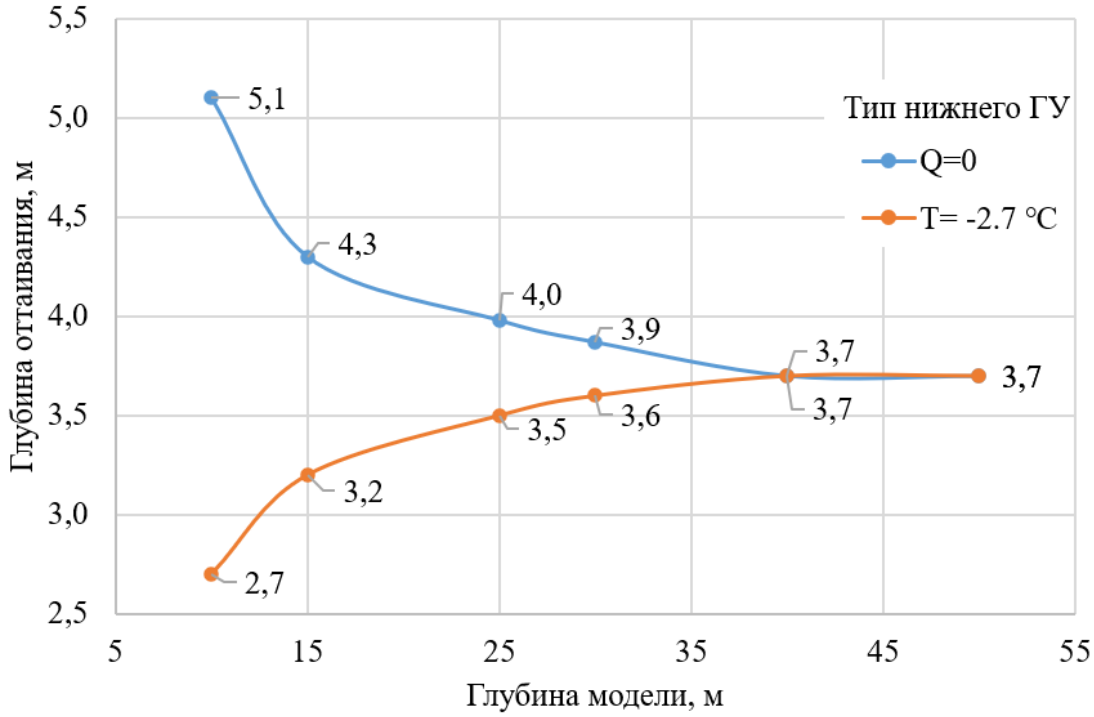


Рисунок 57 – Определение оптимальной модельной глубины для участка №2 при оптимальной ширине модели 40 м

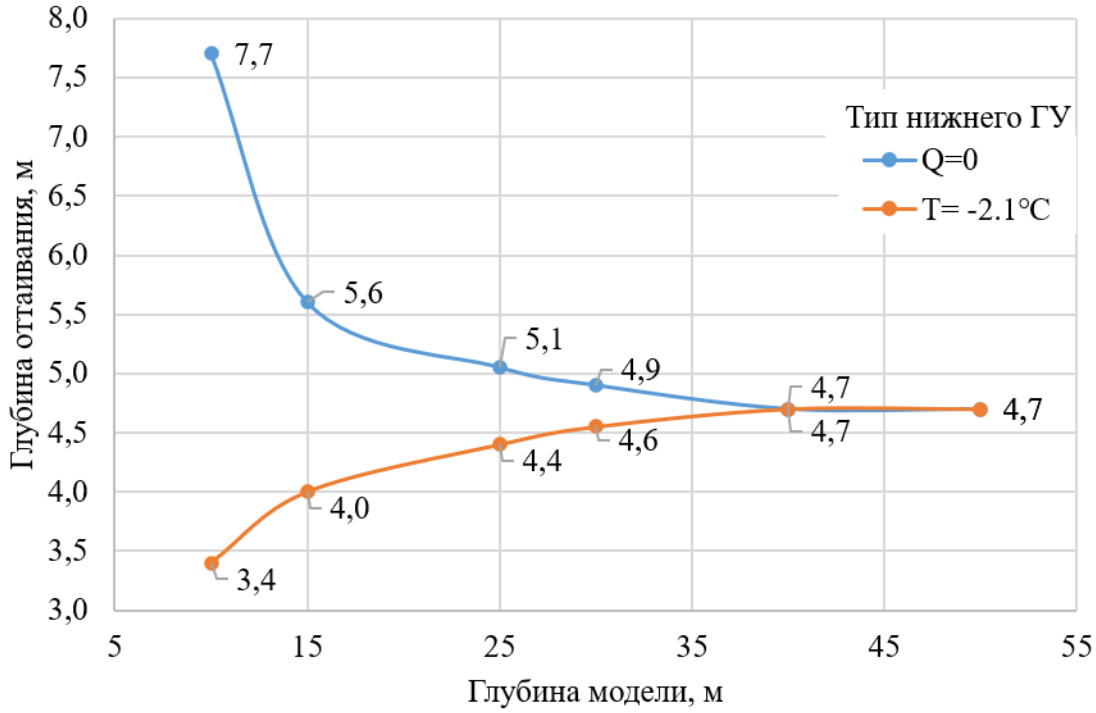


Рисунок 58 – Определение оптимальной модельной глубины для участка №3 при оптимальной ширине модели 40 м

На Рисунках 59–64 показаны результаты моделирования для типовых участков при оптимальных размерах модельной области при двух типах задания нижнего ГУ.

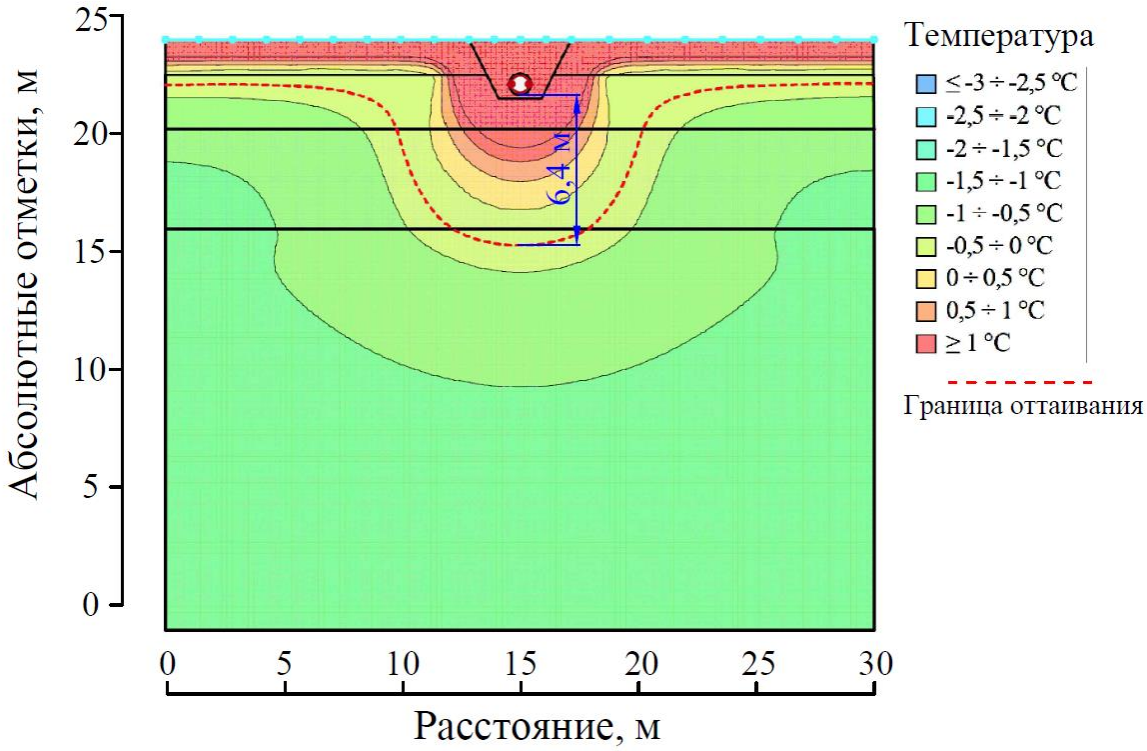


Рисунок 59 – Результат теплофизического расчета на типовом участке №1 на октябрь 30-го года эксплуатации при условии нулевого теплового потока на нижней границе

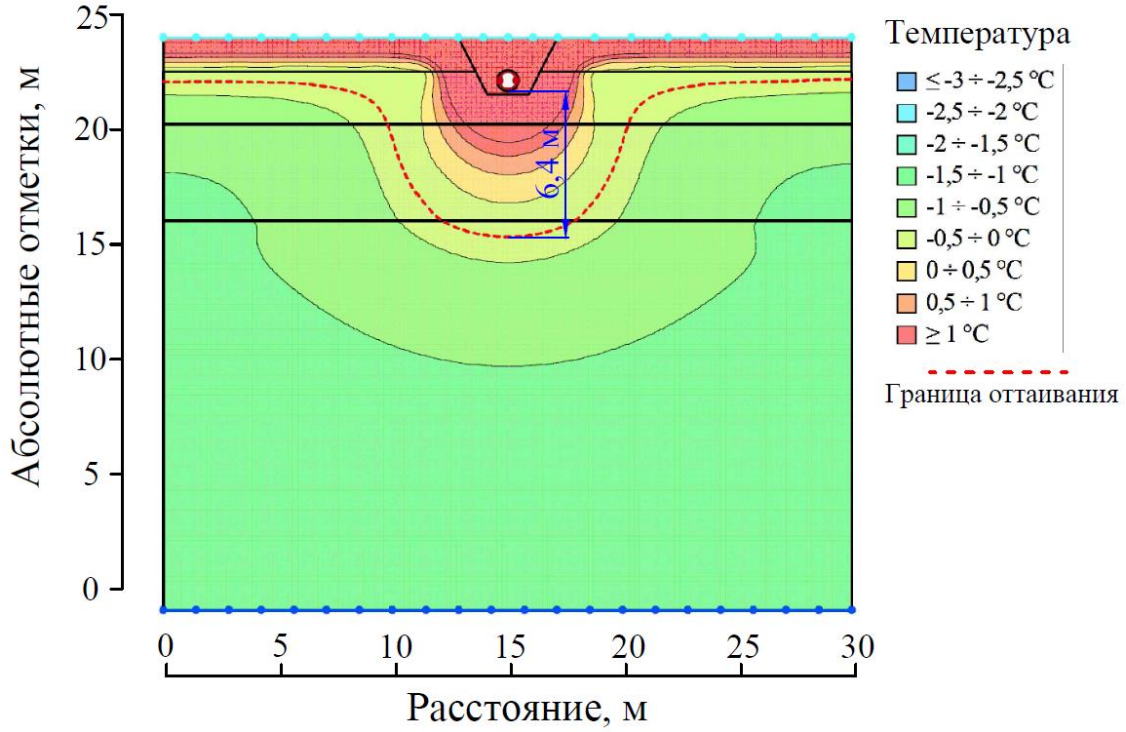


Рисунок 60 – Результат теплофизического расчета на типовом участке №1 на октябрь 30-го года эксплуатации при условии постоянной отрицательной температуры на нижней границе

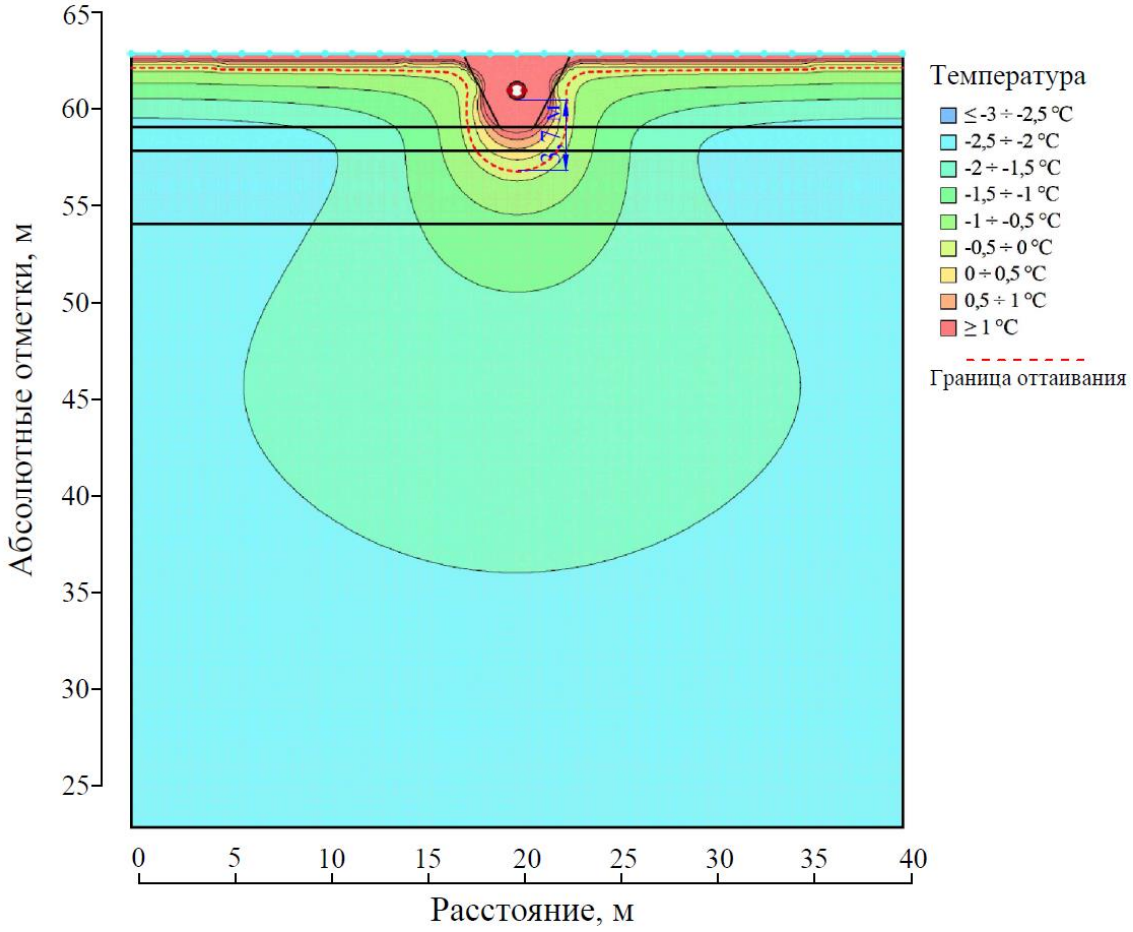


Рисунок 61 – Результат теплофизического расчета на типовом участке №2 на октябрь 30-го года эксплуатации при условии нулевого теплового потока на нижней границе

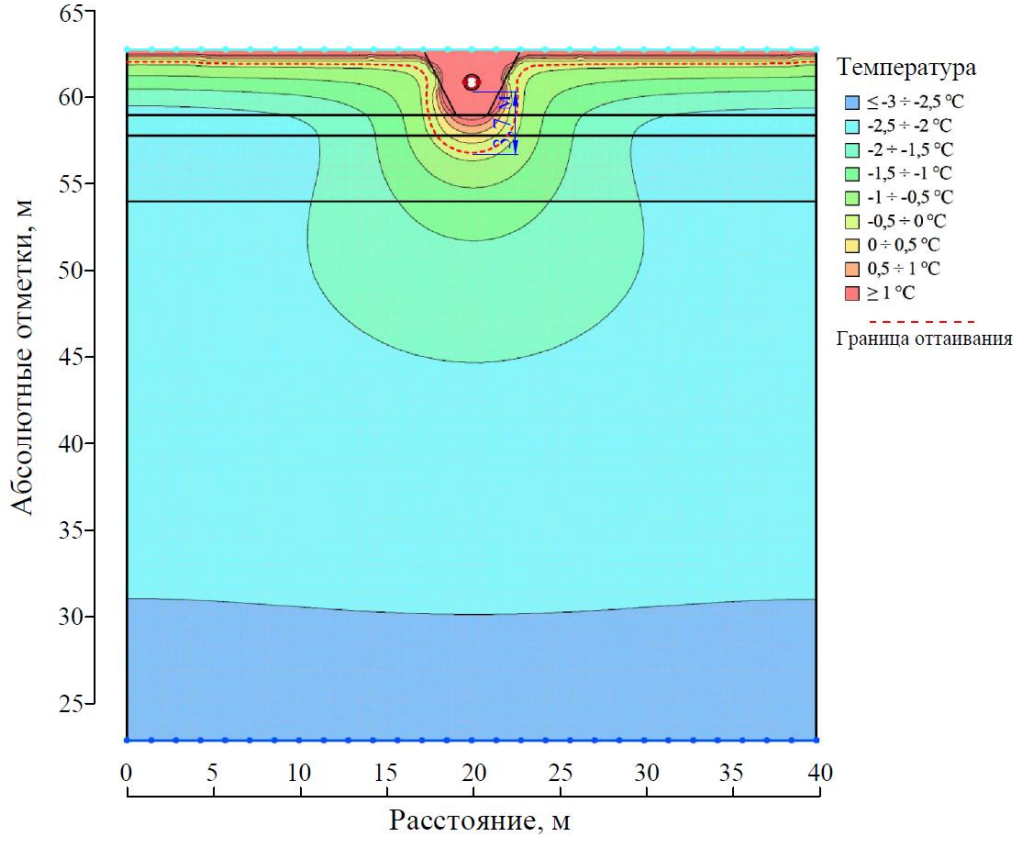


Рисунок 62 – Результат теплофизического расчета на типовом участке №2 на октябрь 30-го года эксплуатации при условии постоянной отрицательной температуры на нижней границе

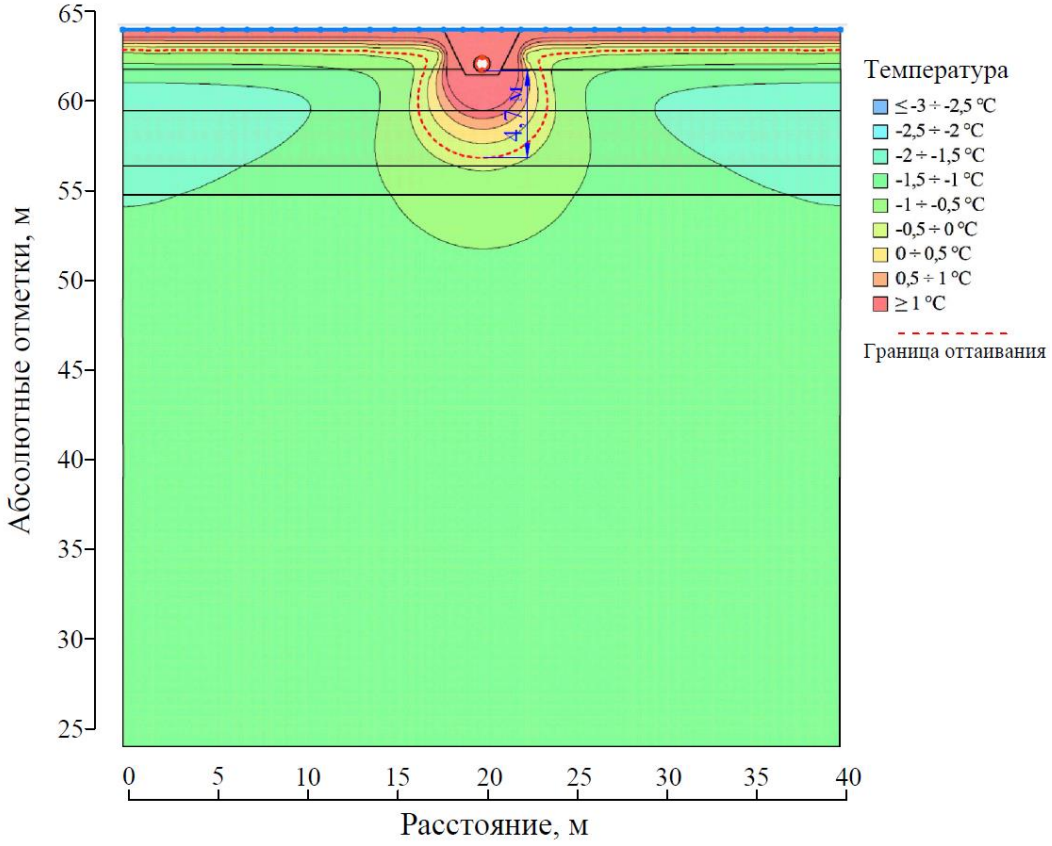


Рисунок 63 – Результат теплофизического расчета на типовом участке №3 на октябрь 30-го года эксплуатации при условии нулевого теплового потока на нижней границе

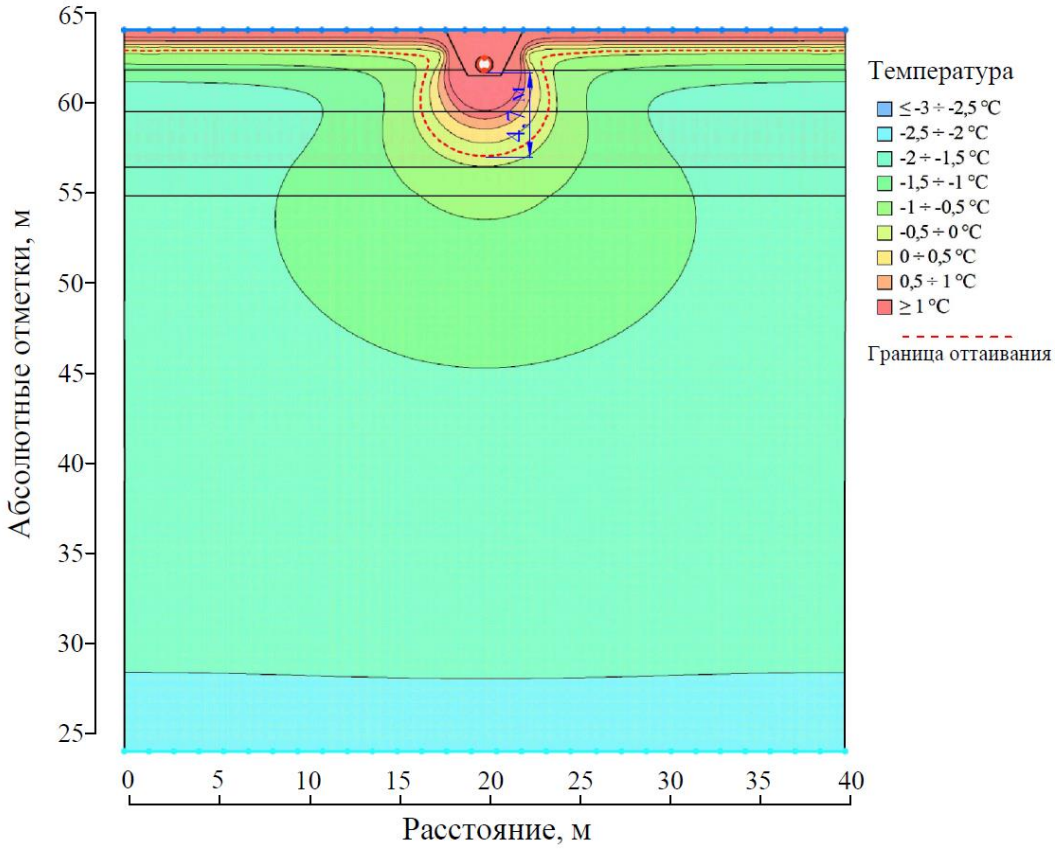


Рисунок 64 – Результат теплофизического расчета на типовом участке №3 на октябрь 30-го года эксплуатации при условии постоянной отрицательной температуры на нижней границе

Для верификации полученных результатов численного моделирования были выполнены расчеты согласно применяемой в практике методике [96], согласно которой глубина оттаивания многолетнемерзлого грунта под центром трубопровода (H_{th}), при его подземном заложении, рассчитывается по следующей формуле:

$$H_{th} = \begin{cases} \zeta_t \cdot r_{ins} \text{ при } \beta \le 0{,}1 \\ \zeta_n \cdot r_{ins} \text{ при } \beta > 0{,}1 \end{cases}, \quad (5.5)$$

где $\zeta_{t,n}$ – безразмерная глубина оттаивания под центром трубы, определяется по номограммам (Рисунки 65–66) в зависимости от параметров m, β_t, I_t.

Коэффициент m, определяется как отношение:

$$m = h_p / r_{ins}, \quad (5.6)$$

где h_p – глубина заложения подземного трубопровода, от дневной поверхности до центра трубы, м, r_{ins} – радиус трубопровода с теплоизоляцией, м; βt – безразмерная температура, определяемая формулой:

$$\beta_t = -\frac{\lambda_f (T_0 - T_{bf})}{\lambda_{th} (T_{ins} - T_{bf})}, \quad (5.7)$$

где $\lambda_{th,f}$ – коэффициенты теплопроводности мерзлого и талого грунта, Вт/м °С; T_0 – температура ММГ у подошвы слоя с годовыми теплооборотами, °С; T_{bf} – температура замерзания грунта, °С; I_t – безразмерное время, для сливающегося типа ММГ, определяемое по формуле:

$$I_t = \frac{\lambda_{th}(T_{ins} - T_{bf})t}{4L_v r_{ins}^2}, \tag{5.8}$$

где t – период эксплуатации трубопровода, 262 800 часов (30 лет); L_v – объемный расход тепла при таянии ММГ, вычисляется по формуле:

$$L_v = L_0\rho_f \frac{W_{tot} - W_w}{1 + W_{tot}} + 0,5C_{th}T_{ins} - C_f T_0, \tag{5.9}$$

где L_0 – удельная теплота фазовых превращений воды, 93 Втч/кг; W_{tot} – суммарная влажность мерзлого грунта, д.е.; W_w – количество незамерзшей воды в мерзлом грунте при температуре T_0, д.е.; ρ_f – плотность мерзлого грунта, кг/м^3; $C_{th,f}$ – объемная теплоемкость талого и мерзлого грунта, Втч/(м^3°С).

Средняя годовая температура внешней поверхности кольцевой изоляции трубы (T_{ins}) вычисляется по формулам:

$$T_{ins} = \left(T_{pr} + T_0 \frac{2\pi\lambda_{th}R_T}{A_p}\right) / \left(1 + \frac{2\pi\lambda_{th}R_T}{A_p}\right), \tag{5.10}$$

$$R_T = \frac{1}{2\pi\lambda_{ins}} \ln\frac{r_{ins}}{r_p}, \tag{5.11}$$

$$A = \ln\left(\frac{h_p}{r_{ins}} + \sqrt{\frac{h_p^2}{r_{ins}^2} - 1}\right), \tag{5.12}$$

где T_{pr} – среднегодовая температура нефти, °С; λ_{ins} – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала, Вт/(м·°С), λ_{th} – коэффициент теплопроводности талого грунта, Вт/(м·°С); T_0 – температура многолетнемерзлого грунта, °С; h_p – глубина заложения подземного трубопровода, от дневной поверхности до центра трубы, м; r_{ins} – радиус трубопровода с теплоизоляцией, м; r_p – радиус трубы без теплоизоляции, м.

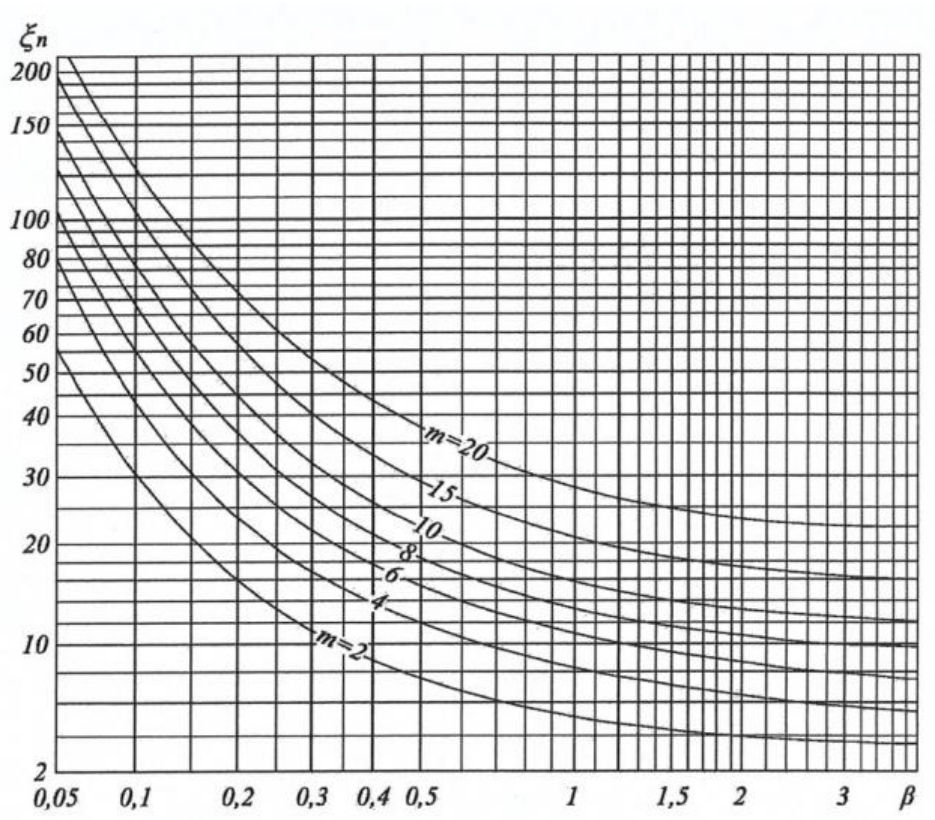


Рисунок 65 – Номограмма безразмерного параметра ζ_n для определения величины оттаивания под трубопроводом [96]

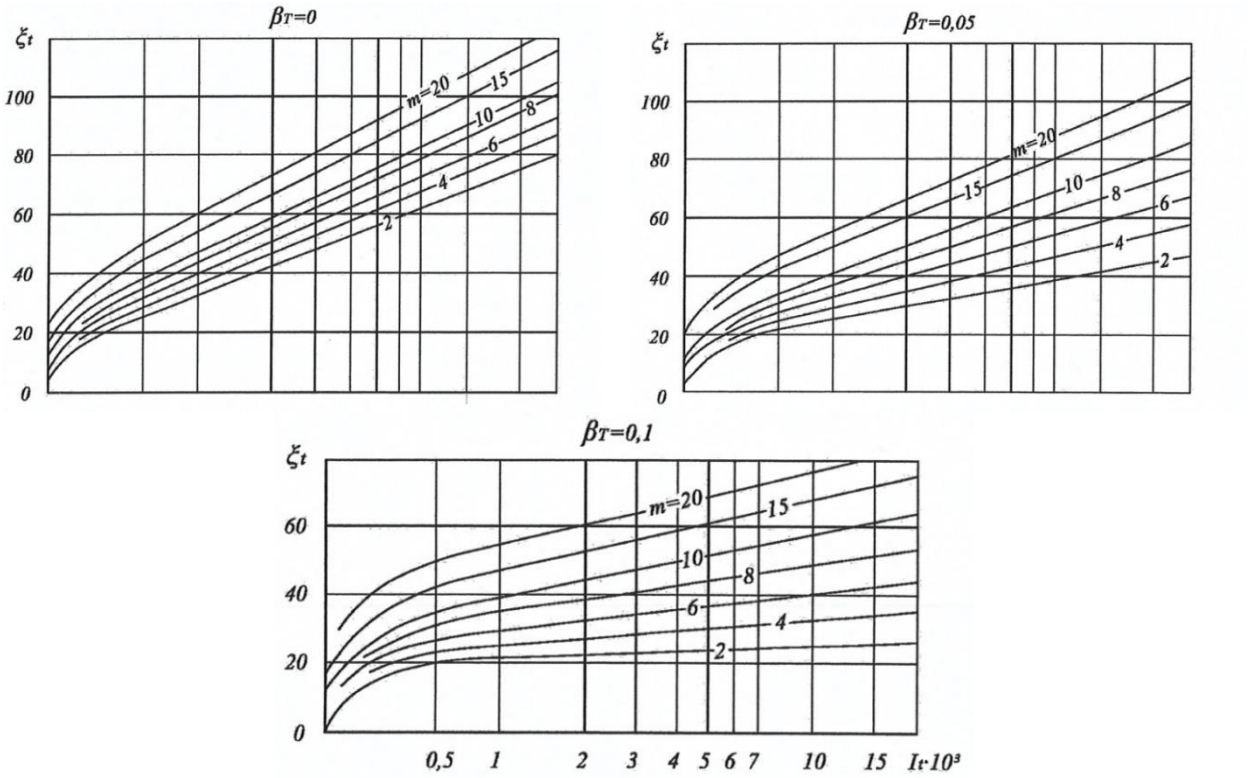


Рисунок 66 – Номограммы безразмерного параметра ζ_t для определения величины оттаивания под трубопроводом [96]

В Таблице 27 приведены результаты определения глубины оттаивания под нефтепроводом (отсчет от подошвы трубопровода) на рассматриваемых типовых участках.

Таблица 27 – Результаты определения глубины оттаивания на рассматриваемых типовых участках

Участок	Оптимальная область моделирования – ширина/глубина, м	Глубина оттаивания, полученная при численном моделировании, м	Глубина оттаивания, полученная по СП 25.13330, м	Осадка для глубины оттаивания, определенной численным методом, м	Осадка для глубины оттаивания, определенной по СП 25.13330, м
№1. Терраса	30/25	6,4	6,0	0,43	0,40
№2. Верховое болото	40/40	3,7	2,5	0,37	0,21
№3. Ледниковая равнина	40/40	4,7	4,0	0,46	0,40

Таким образом, по результатам расчетов на всех рассматриваемых участках прогнозная осадка на конец эксплуатации нефтепровода не превышает критическую величину в 50 см, однако находится близко к критической, что обуславливает актуальность оценки состояния КЛТС с позиций теории надежности.

Если принять результаты приближенно-аналитического решения для оценки необходимой глубины расчетной модели согласно рекомендациям по теплотехническим расчетам РСН 67–87 она должна составлять от 16 до 19 м (не менее 10 м ниже величины оттаивания, но не менее 15 м). При этом согласно требованиям на проведение ИГ изысканий глубина скважин может быть ограничена 11 до 14 м (5 м ниже глубины оттаивания, но не менее 10 м). По результатам расчетов оптимальная глубина значительно больше этих величин, что говорит о недостаточности исходной информации для целей численного моделирования.

В данном случае приближенно-аналитический способ оценки величины оттаивания дает отличающиеся, но достаточно близкие результаты, что, разумеется, обусловлено допущениями в расчетах.

Методика и результаты применения метода точечной оценки

Стохастические расчеты выполнялись для двух сценариев:

1. Учет вариативности теплопроводности грунтов обратной засыпки, представленных мелкозернистыми песками (в мерзлом и талом состоянии). Стандартное отклонение было принято исходя из допустимого коэффициента вариации теплофизических свойств для инженерно-геологического элемента – 0,3 [25].

2. Совместный учет температуры нефти и теплопроводности теплоизоляции. В расчетах стандартное отклонение температуры нефти было принято – 5°С, стандартное отклонение теплопроводности теплоизоляции – 0,003 Вт/м°С, что составляет 10% от среднего значения.

Выбор в качестве тестируемого параметра величины теплопроводности обратной засыпки обусловлен тем, что что свойства обратной засыпки будут сильно зависеть как от условий строительства и прокладки трассы нефтепровода, так и выбором материала засыпки, что является важным фактором неопределенности задачи. Как уже упоминалось ранее, величина теплопроводности песчаных грунтов будет сильно зависеть от минералогического состава, определение которого обычно не выполняется и может в значительной степени варьироваться от выбранных месторождений.

Находясь в рамках схематизации, принятой в инженерно-геологической практике, грунты обратной засыпки траншеи нефтепровода всегда должны быть выделены в отдельный ИГЭ. В качестве закона распределения грунтовых характеристик обычно принимается нормальный закон, на котором основана и методика статистической обработки результатов испытаний [25]. Теоретической предпосылкой такого допущения служат центральная предельная теорема и свойство устойчивости нормального распределения [107]. Согласно данному НТД, применяемые методы статистической обработки используют нормальный закон распределения вероятностей, а при обосновании может быть использован логарифмически нормальный.

Однако, достоверно узнать теплофизические свойства грунтов обратной засыпки принципиально возможно только уже после завершения строительства трассы нефтепровода, путем отбора образцов в ненарушенном строении и соответственно лабораторного определения теплопроводности. При принятии проектных решений используются ориентировочные значения теплопроводности любого используемого материала. Обоснование закона распределения свойств обратной засыпки принципиально выполнить невозможно, поэтому принят «по умолчанию» нормальный закон.

Выбор температуры нефти в качестве параметра неопределенности продиктован спецификой технологического процесса ее транспортировки, в ходе которого могут наблюдаться колебания температуры. Кроме того, температура нефти зависит от расстояния до станций ее поддерживающих. Вариативность теплопроводности теплоизоляции связана с особенностями производства (допуск по точности заявленной теплопроводности).

Для определения критической глубины оттаивания, при которой прогнозная осадка составит более 50 см, для каждого рассматриваемого типового участка был выполнен расчет зависимости осадки от возможной глубины оттаивания (Рисунки 67–69).

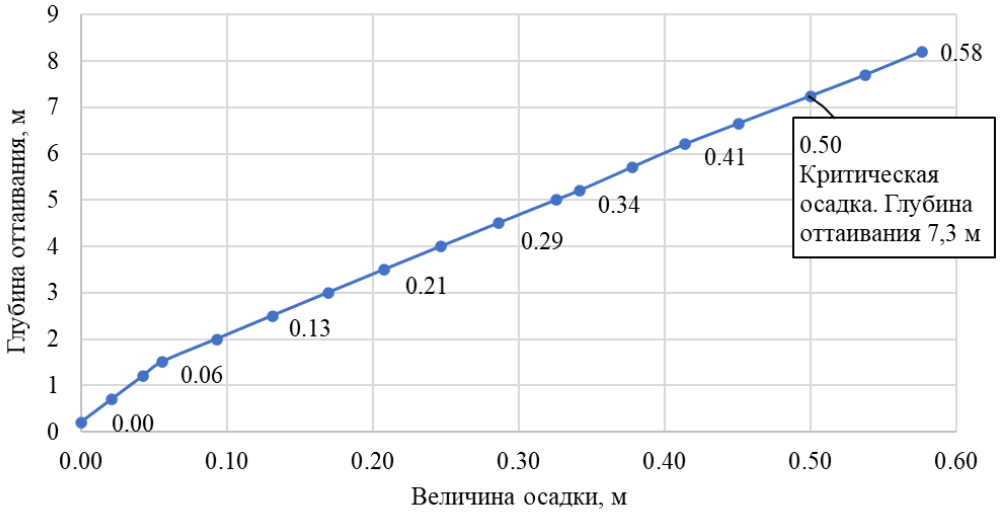


Рисунок 67 – Зависимость величины осадки от возможной глубины оттаивания для участка №1 (речная терраса)

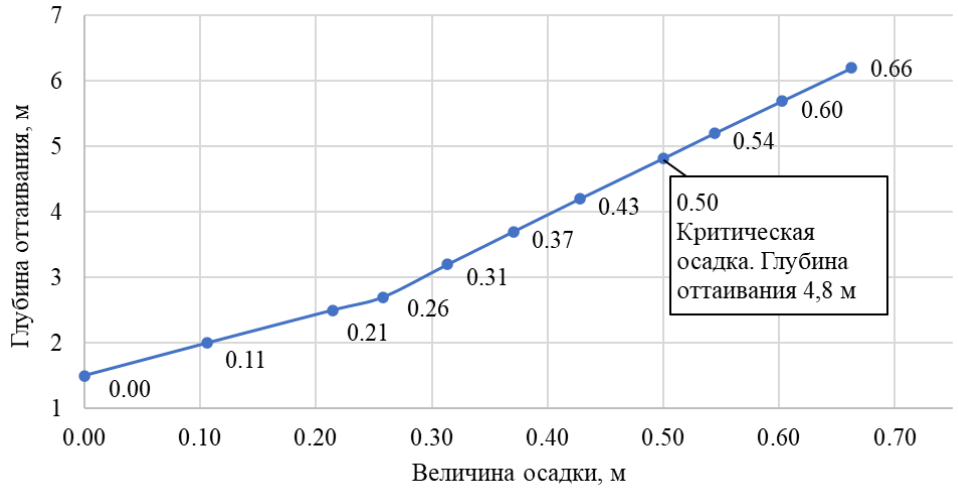


Рисунок 68 – Зависимость величины осадки от возможной глубины оттаивания для участка верхового болота

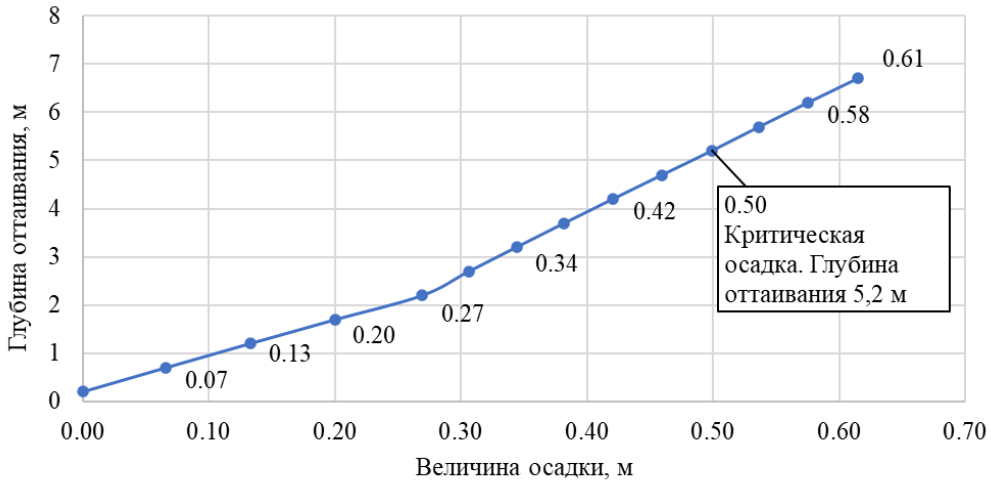


Рисунок 69 – Зависимость величины осадки от возможной глубины оттаивания для участка ледниковой равнины с распространенными льдистыми грунтами

Используя метод точечной оценки, выполнены четыре варианта расчета для каждого типового участка в которых теплопроводность грунтов обратной засыпки изменялась на величину стандартного отклонения в отрицательную и положительную сторону, аналогичным способом выполнены расчеты и для температуры нефти и теплопроводности теплоизоляции Результаты расчетов для каждого выделенного участка методом точечной оценки приведены в Таблицах 28–33.

Таблица 28 – Стохастические параметры при учете влияния на величину оттаивания теплопроводности обратной засыпки для участка №1

Вариант расчета	λ_{th}, Вт/(м·°С)	λ_f, Вт/(м·°С)	Глубина оттаивания, м	Стандартное отклонение глубины оттаивания	Математическое ожидание глубины оттаивания
$P_1(\lambda th–; \lambda f–)$	1,47	1,75	6,7	0,30	6,33
$P_2(\lambda th+; \lambda f–)$	2,73*	2,73	6,4		
$P_3(\lambda th+; \lambda f+)$	2,73	3,25	6,2		
$P_4(\lambda th–; \lambda f+)$	1,47	3,25	6,0		
*Примечание: в данном расчетном случае λ_{th} не может быть больше λ_f, поэтому значения были приравнены					

Таблица 29 – Стохастические параметры при учете влияния на величину оттаивания температуры нефти и теплопроводности теплоизоляции для участка №1

Вариант расчета	Температура нефти, °С	$\lambda_{из}$, Вт/(м·°С)	Глубина оттаивания, м	Стандартное отклонение глубины оттаивания	Математическое ожидание глубины оттаивания
P_1 ($T_н–; \lambda_{из}–$)	45	0,027	5,7	0,53	6,35
P_2 ($T_н+; \lambda_{из}–$)	55	0,027	6,4		
$P_3(T_н+; \lambda_{из}+)$	55	0,033	7,0		
P_4 ($T_н–; \lambda_{из}+$)	45	0,033	6,3		

Таблица 30 – Стохастические параметры при учете влияния на величину оттаивания теплопроводности обратной засыпки для участка №2

Вариант расчета	λ_{th}, Вт/(м·°С)	λ_f, Вт/(м·°С)	Глубина оттаивания, м	Стандартное отклонение глубины оттаивания	Математическое ожидание глубины оттаивания
$P_1(\lambda th–; \lambda f–)$	1,47	1,75	4,2	0,57	3,55
$P_2(\lambda th+; \lambda f–)$	2,73*	2,73	3,8		
$P_3(\lambda th+; \lambda f+)$	2,73	3,25	3,3		
$P_4(\lambda th–; \lambda f+)$	1,47	3,25	2,9		
*Примечание: в данном расчетном случае λ_{th} не может быть больше λ_f, поэтому значения были приравнены					

Таблица 31 – Стохастические параметры при учете влияния на величину оттаивания температуры нефти и теплопроводности теплоизоляции для участка №2

Вариант расчета	Температура нефти, °С	$\lambda_{из}$, Вт/(м·°С)	Глубина оттаивания, м	Стандартное отклонение глубины оттаивания	Математическое ожидание глубины оттаивания
P_1 ($T_н–; \lambda_{из}–$)	45	0,027	2,9	0,70	3,75
P_2 ($T_н+; \lambda_{из}–$)	55	0,027	3,8		
$P_3(T_н+; \lambda_{из}+)$	55	0,033	4,6		
P_4 ($T_н–; \lambda_{из}+$)	45	0,033	3,7		

Таблица 32 – Стохастические параметры при учете влияния на величину оттаивания теплопроводности обратной засыпки для участка №3

Вариант расчета	λ_{th}, Вт/(м·°С)	λ_f, Вт/(м·°С)	Глубина оттаивания, м	Стандартное отклонение глубины оттаивания	Математическое ожидание глубины оттаивания
$P_1(\lambda th–; \lambda f–)$	1,47	1,75	5,3	0,40	4,73
$P_2(\lambda th+; \lambda f–)$	2,73*	2,73	4,7		
$P_3(\lambda th+; \lambda f+)$	2,73	3,25	4,4		
P_4 ($\lambda th–; \lambda f+$)	1,47	3,25	4,5		
*Примечание: в данном расчетном случае λ_{th} не может быть больше λ_f, поэтому значения были приравнены					

Таблица 33 – Стохастические параметры при учете влияния на величину оттаивания температуры нефти и теплопроводности теплоизоляции для участка №3

Вариант расчета	Температура нефти, °С	$\lambda_{из}$, Вт/(м·°С)	Глубина оттаивания, м	Стандартное отклонение глубины оттаивания	Математическое ожидание глубины оттаивания
P_1 ($T_н$–; $\lambda_{из}$–)	45	0,027	4,0	0,66	4,80
P_2 ($T_н$+; $\lambda_{из}$–)	55	0,027	4,9		
P_3($T_н$+; $\lambda_{из}$+)	55	0,033	5,6		
P_4 ($T_н$–; $\lambda_{из}$+)	45	0,033	4,7		

Используя интегральную функцию распределения вероятности глубины оттаивания, построенную по найденным значениям математического ожидания и стандартного отклонения, находятся вероятности превышения критической осадки в 50 см для каждого участка для двух тестируемых пар переменных (Рисунки 70–72).

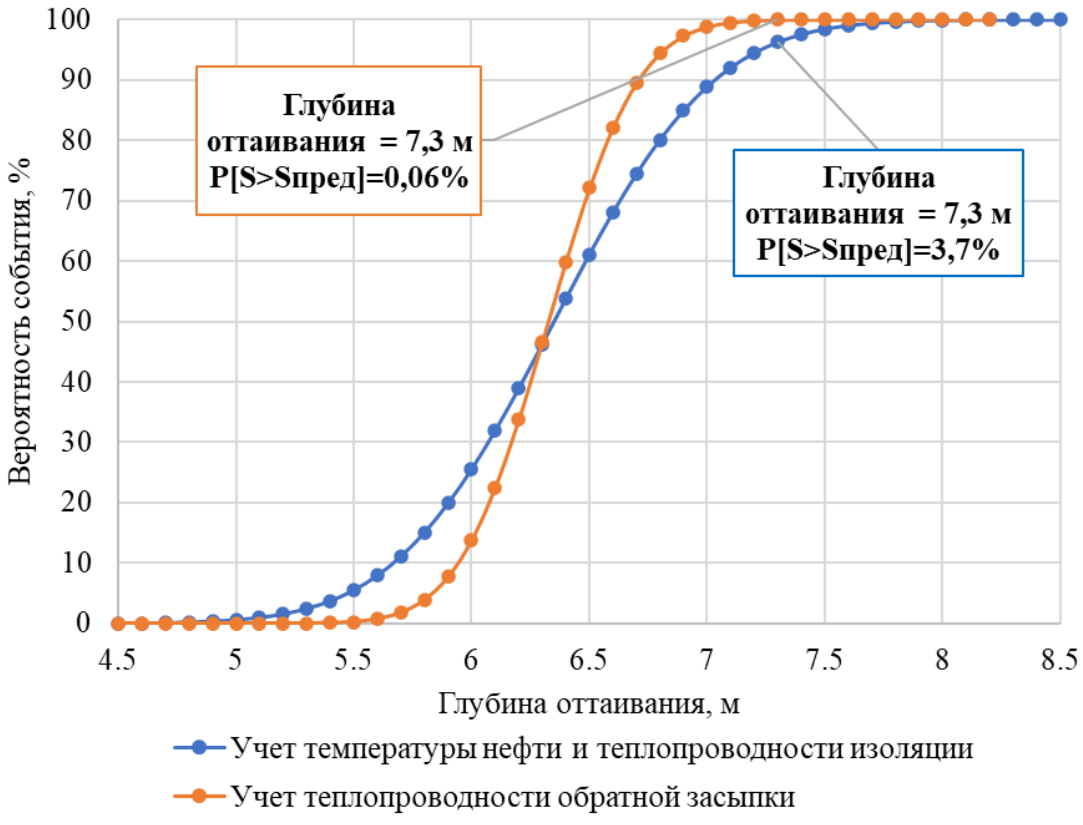


Рисунок 70 – Интегральная функция распределения вероятности глубины оттаивания для участка №1 (речная терраса)

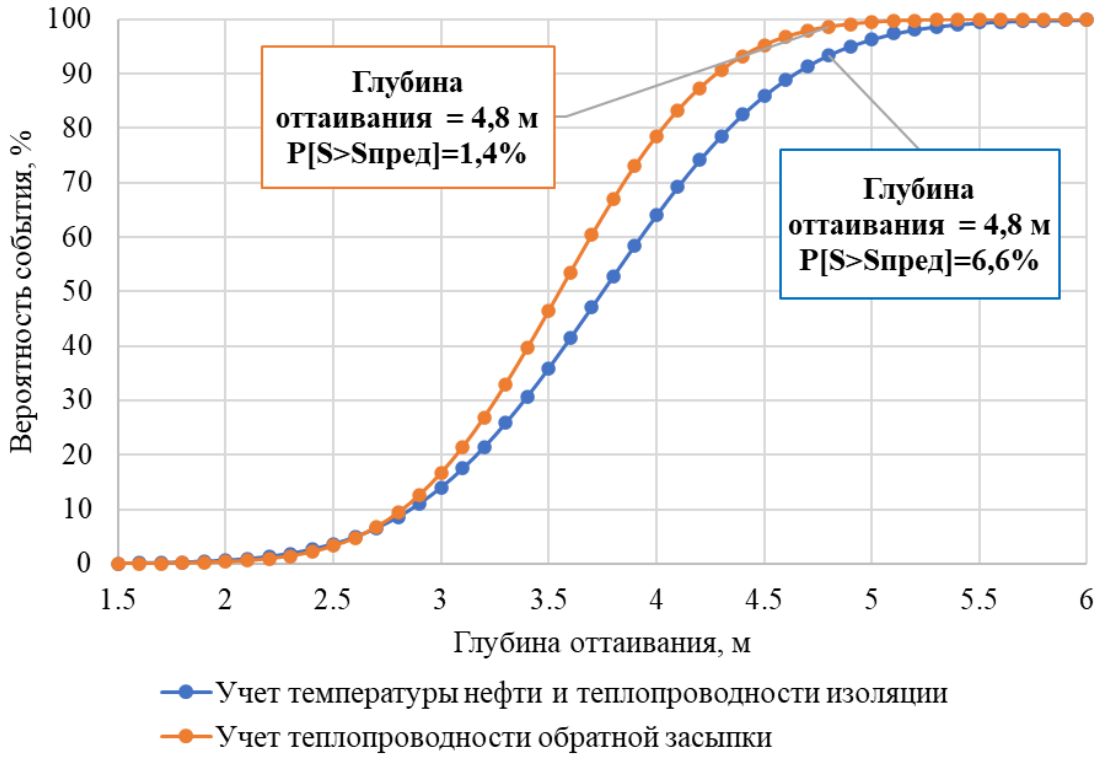


Рисунок 71 – Интегральная функция распределения вероятности глубины оттаивания для участка №2 (верховое болото)

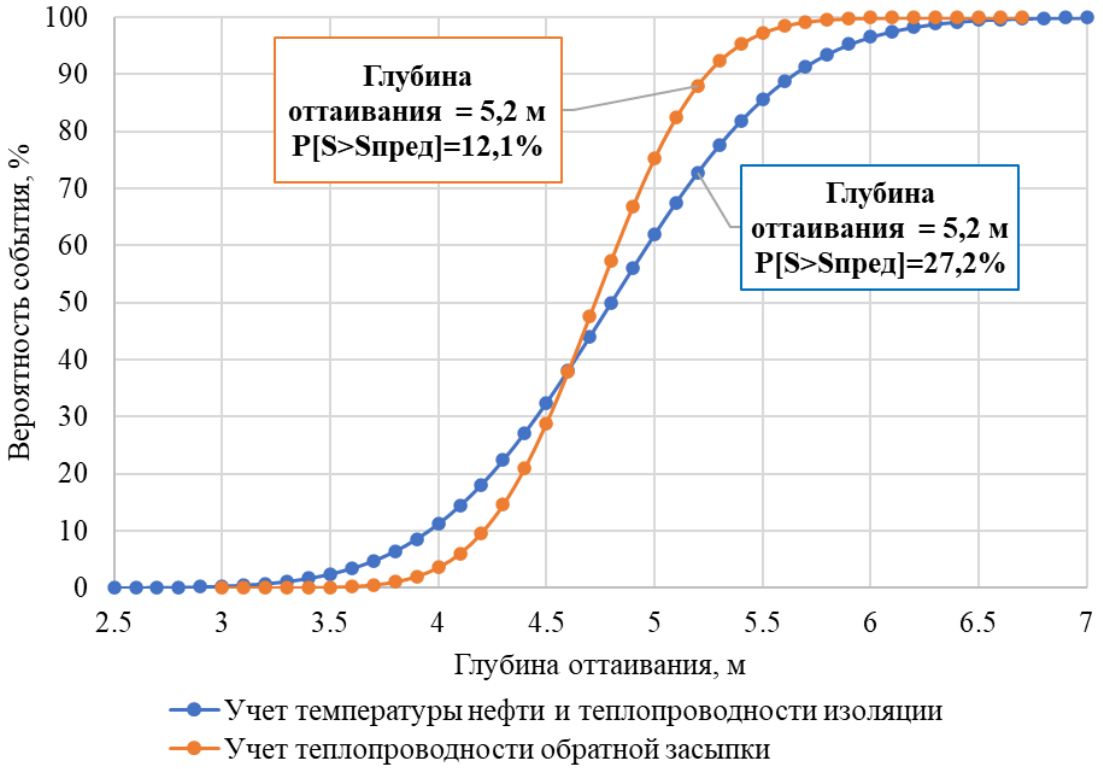


Рисунок 72 – Интегральная функция распределения вероятности глубины оттаивания для участка №3 (ледниковая равнина с распространенными льдистыми грунтами)

Оценка надежности рассматриваемой КЛТС может быть выполнена на основе вероятности превышения критической глубины оттаивания в соответствии с уровнями надежности, рекомендуемые департаментом военных инженеров армии США (Рисунок 36).

Итоговые результаты вероятностных расчетов, с оценкой уровня надежности приведены в Таблице 34.

Таблица 34 – Надежность КЛТС на выделенных типовых участках

№	Типовой участок	Критическая величина оттаивания, м	Сценарий расчета	Вероятность превышения предельно допустимой осадки, %	Уровень надежности
1	Речная терраса	7,3	λ обратной засыпки	0,06	Надежный-удовлетворительный
			T нефти, λ теплоизоляции	3,7	Опасный-высокоопасный
2	Верховое болото	4,8	λ обратной засыпки	1,4	Ненадежный-опасный
			T нефти, λ теплоизоляции	6,6	Опасный-высокоопасный
3	Ледниковая равнина	5,2	λ обратной засыпки	12,1	Высокоопасный-аварийно-опасный
			T нефти, λ теплоизоляции	27,2	Аварийно-опасный

Последовательность выполнения шагов при стохастическом подходе определения глубины оттаивания и оценки надежности КЛТС приведена на Рисунке 73.

По результатам расчетов, несмотря на то что величина осадки не достигает критических значений на каждом участке при средней величине оттаивания, с точки зрения теории надежности каждый типовой участок стоит отнести как минимум к опасному уровню надежности.

Поскольку при тестировании температуры нефти и теплопроводности теплоизоляции в качестве независимых переменных видно большее значение стандартного отклонения нежели при тестировании теплопроводности засыпки, можно сделать вывод, что, влияние температуры нефти и теплопроводности теплоизоляции будут более важными и определяющими факторами при решении данной задачи.

В то же время можно сказать, что теплопроводность грунтов обратной засыпки также является важным фактором неопределенности, который стоит учитывать при моделировании.

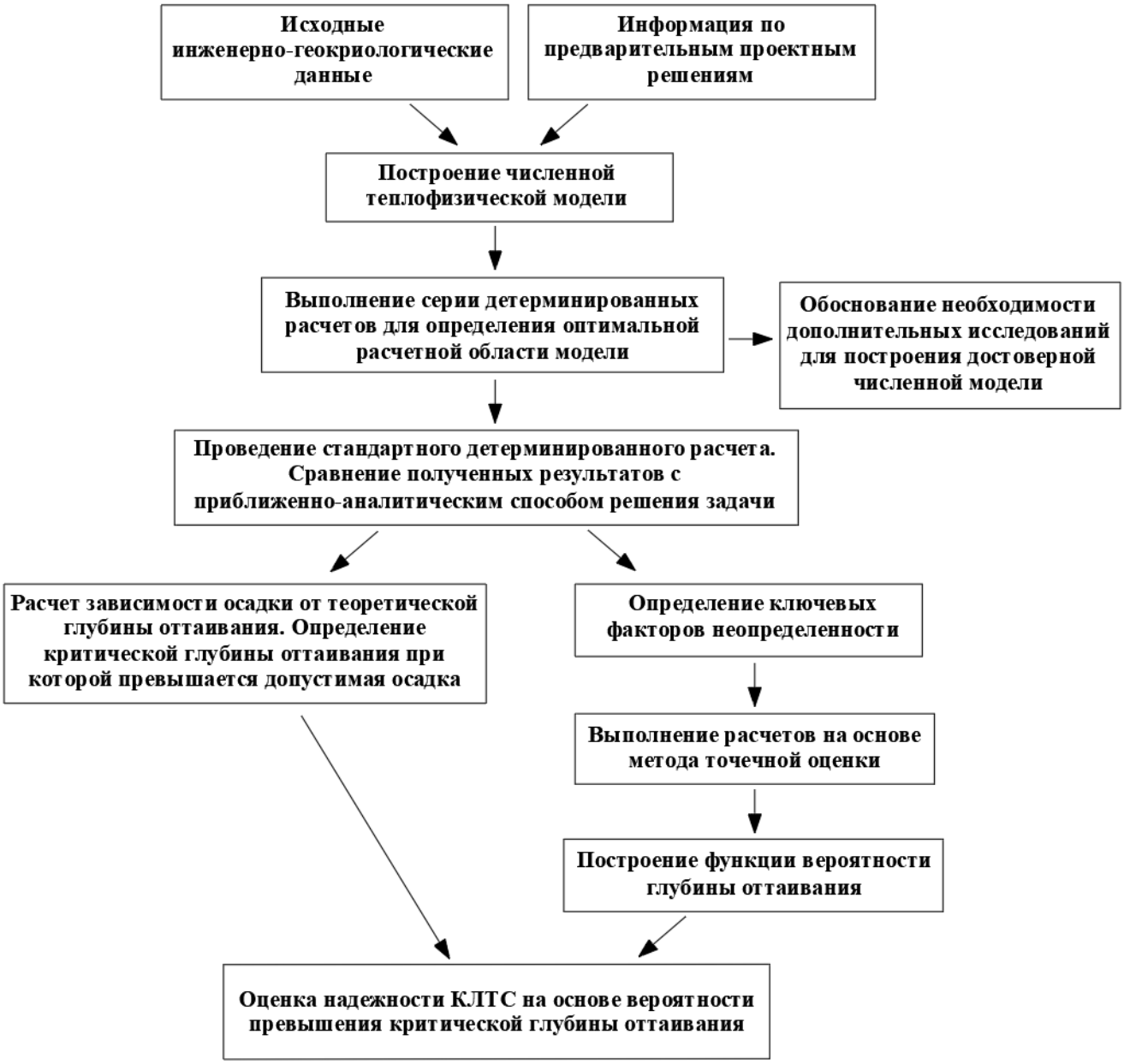


Рисунок 73 – Алгоритм применения стохастического подхода по определению глубины оттаивания нефтепровода

Свой вклад в неопределенность задачи вносит фактор недостаточной изученности инженерно-геокриологических условий по глубине. Для принятия окончательных проектных решений необходимо уточнение инженерно-геокриологических условий на глубину, определенную по результатам расчетов.

5.5 Выводы

Использование стохастического подхода при прогнозировании теплового взаимодействия сооружений с мерзлыми грунтами является актуальным направлением совершенствования инженерно-геокриологического прогноза, в силу высокой многофакторности процессов

промерзания и оттаивания грунтов и их зависимости от массы параметров различной физической природы.

Стохастический подход позволяет учитывать различные факторы неопределенности теплофизической задачи, тем самым повышая надежность результатов численного моделирования, и дает возможность оценить состояние системы с позиций теории надежности.

Использование статистического метода Монте-Карло для численного моделирования процессов промерзания и оттаивания в настоящий момент в инженерно-геокриологической практике затруднительно, ввиду необходимого значительного количества вычислительной мощности и ограниченности реализации данного метода в специализированных программах.

Применение метода точечной оценки в ходе теплофизического моделирования продемонстрировано на примере расчетов величины оттаивания горячего нефтепровода, что позволило оценить надежность КЛТС на выбранных типовых участках трассы. Важной составляющей данного подхода является верное установление ключевых тестируемых факторов неопределенности решаемой задачи.

Таким образом в данной главе обосновано четвертое защищаемое положение. **Стохастический подход с использованием метода точечной оценки при теплофизическом моделировании позволяет выявить неопределенность прогнозных оценок состояния литотехнической системы и оценить ее с позиции теории надежности.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для литотехнических систем в криолитозоне характерны уникальные особенности строения, функционирования, а также подходы к их изучению:

- Управляющие взаимодействия направлены в первую очередь на управление температурным полем мерзлых грунтов.
- Высокая чувствительность к малейшим изменениям компонентов системы. Высокая интенсивность опасных инженерно-геокриологических процессов.
- Сложность системы обуславливает высокий уровень схематизации математических моделей. Прогноз состояния системы всегда связан с решением теплофизической задачи и выполняется на определенный срок эксплуатации сооружения.
- Особый подход к проектированию сооружений в районах распространения ММГ, а также к управлению опасными инженерно-геокриологическими процессами.
- Междисциплинарный подход к изучению системы.
- Важность геоэкологического прогноза, ввиду быстрого, масштабного и иногда необратимого изменения экологических систем криолитозоны.
- Особый подход к проведению инженерно-геологических исследований.

По совокупности особенностей предлагается определять ЛТС в криолитозоне как особую криолитотехническую систему (КЛТС), представленную целостной совокупностью, взаимодействующих подсистем – технических объектов и области литосферы, имеющей в своем составе грунты с отрицательной или нулевой температурой, функционирование которой определяют процессы промерзания и оттаивания под влиянием природных и техногенных факторов.

Выделение понятия КЛТС базируется на отличительных особенностях взаимодействия сооружений с литосферой: определяющим взаимодействием подсистемы «сооружение» с компонентом литосферы – криолитосферой, а также определяющим процессом функционирования в сфере взаимодействия – промерзанием и оттаиванием.

Численное моделирование в инженерной геокриологии стало неотъемлемой частью решения практических задач. Правильный выбор типа и параметров граничных условий позволяет адекватно описывать физические процессы, происходящие в расчетной области, и минимизировать ошибки в прогнозах.

В рамках решения инженерно-геокриологических задач наибольшие затруднения возникают при обосновании мощности приповерхностной области литосферы, которая должна быть охарактеризована инженерно-геокриологической информацией. Неверный выбор глубины

исследований приводит к неудовлетворительной оценке замкнутости инженерно-геокриологической информации в пределах сферы взаимодействия.

Для проведения численного теплофизического моделирования необходимо иметь оптимальный объем информации о инженерно-геокриологических условиях, который соответствует целям моделирования.

Параметры нижнего граничного условия при численном теплофизическом моделировании отвечают за проверку замкнутости информации по глубине и соответственно отвечает за оценку объема КЛТС и существенно влияют на распределение температурного поля грунтов.

Обоснование параметров сферы взаимодействия возможно выполнить в ходе численного моделирования посредством минимизации влияния нижнего граничного условия на результаты оценки теплового состояния грунтового массива, таким образом определяется оптимальная глубина исследования инженерно-геокриологических условий с точностью необходимой для решения инженерной задачи.

Теплофизические свойства грунтов, являются ключевыми исходными параметрами для моделирования, играют важную роль в обеспечении его точности и достоверности получаемых результатов.

Теплопроводность дисперсных грунтов может быть оценена при помощи использования различных математических моделей, которые можно разделить на две группы – теоретические и эмпирические. В данных моделях выделяются три группы факторов, оказывающих влияние на определение величины теплопроводности: физические свойства, минеральный состав, содержание незамерзшей воды. Подробно рассмотрены основные модели теплопроводности мерзлых грунтов – модель Йохансена и модель Фаруки. Показана их лучшая эффективность по сравнению с принятым в практике методом.

От минерального состава дисперсных грунтов может значительно зависеть величина теплопроводности, экспериментальное определение которого позволит значительно повысить точность моделей. Проанализированы существующие способы определения теплопроводности частиц грунта и определен наилучший существующий метод.

Теплофизические свойства мерзлых грунтов не являются постоянными и зависят от температуры, что связано это с динамическим содержанием незамерзшей воды, которое зависит от многих факторов, но в первую очередь от засоленности грунта и гранулометрического состава (который может косвенно отражать минеральный состав).

Рассмотрены основные теоретические положения подхода по использованию характеристической кривой влажности – SWCC применительно к мерзлым грунтам. Данная методика широко используется зарубежными исследователями для описания

термодинамического состояния поровой влаги и позволяет учитывать взаимосвязь между температурой, капиллярно-сорбционными свойствами и фазовым состоянием воды.

Характеристическая кривая влажности может быть использована для определения содержания незамерзшей воды и температуры замерзания/оттаивания незасоленных мерзлых грунтов. Полученные данные могут быть использованы в рассмотренных моделях теплопроводности мерзлых грунтов. Безусловно, для повышения достоверности результатов необходимы последующие экспериментальные проверки и уточнение используемых зависимостей на основе лабораторных исследований. Дальнейшее изучение данного вопроса особенно актуально при совместном решении задачи по определению температурного поля и миграции влаги в грунтах.

Использование стохастического подхода при прогнозировании теплового взаимодействия сооружений с мерзлыми грунтами является важным направлением совершенствования инженерно-геокриологического прогноза, ввиду многофакторности и сложности процессов промерзания и оттаивания. Данный подход позволяет учесть неопределенность исходных данных и оценить состояние КЛТС с позиции теории надежности.

Применение метода Монте-Карло, являющегося одним из основных подходов к решению стохастических задач, в теплофизическом моделировании ограничено его высокой вычислительной трудоемкостью. Кроме того, в большинстве существующих программных комплексов данный метод не реализован, что существенно ограничивает его использование при решении практических задач оценки состояния КЛТС.

Применение стохастического подхода при помощи метода точечной оценки в ходе теплофизического моделирования позволяет отслеживать, как неопределенности во входных параметрах создают неопределенность в результатах расчета. Метод является универсальным инструментом для решения любых инженерно-геокриологических задач и позволяет оценить надежность КЛТС, что было продемонстрировано на примере магистрального нефтепровода.

Несмотря на свои ограничения, метод точечной оценки прост в использовании и не требует значительных трудозатрат по расчетам, что делает его особенно актуальным на этапе предварительного проектирования и может послужить эффективным инструментом для принятия окончательных проектных решений.

Таким образом, результаты настоящего исследования дополняют и усовершенствуют существующую методику численного теплофизического моделирования, применяемую при решении широкого круга инженерно-геокриологических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверкина Т. И. Литотехнические системы как результат взаимодействия природных и технических объектов в приповерхностной части литосферы // *Теория и методология экологической геологии* / под ред. В. Т. Трофимова. — М.: МГУ, 1997. — С. 213–236.
2. Алексютина Д. М., Мотенко Р. Г. Теплофизические свойства и фазовый состав влаги мерзлых грунтов уральского берега Байдарской губы // *Инженерная геология*. — 2013. — № 3. — С. 36–43.
3. Арэ Ф. Э. Теплофизические аспекты принципа Цытовича о равновесном состоянии воды и льда в мерзлых грунтах // *Криосфера Земли*. — 2014. — Т. XVIII, № 1. — С. 47–56.
4. Бабаев В. В., Будымка В. Ф., Домбровский М. А., Сергеева Т. А. *Теплофизические свойства горных пород*. — М.: Недра, 1987. — 156 с.
5. Баду Ю. Б. *Криолитогенез. Признаки и призраки криолитосферы*. — М.: Изд-во МГУ, 2021. — 367 с.
6. *Базовые понятия инженерной геологии и экологической геологии: 280 основных терминов* / под ред. В. Т. Трофимова. — М.: Геомаркетинг, 2012. — 320 с.
7. Барановский А. Г. Влияние минерального и химического состава элювиальных глинистых грунтов на их физические свойства // *Инженерная геология и геоэкология: фундаментальные проблемы и прикладные задачи*. — 2016. — С. 28–32.
8. Баренблатт Г. И. О некоторых приближенных методах в теории одномерной неустановившейся фильтрации жидкости при упругом режиме // *Известия АН СССР. Отделение технических наук*. — 1954. — № 9. — С. 35–49.
9. Болдырев Г. Г., Идрисов И. Х. *Методы исследования механических свойств мерзлых грунтов: монография*. — М.: Прондо, 2021. — 608 с.
10. Болотин В. В. *Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений*. — М.: Стройиздат, 1971.
11. Бондарик Г. К. *Общая теория инженерной (физической) геологии*. — М.: Недра, 1981.
12. Бондарик Г. К. *Теория геологического поля*. — М.: АСВ, 2002.
13. Бондарик Г. К., Пендин В. В., Ярг Л. А. *Инженерная геодинамика*. — 4-е изд., доп. — М.: КДУ, 2015. — 472 с.
14. Бондарик Г. К., Чан Мань Л., Ярг Л. А. Научные основы и методика организации мониторинга крупных городов. — М.: ПНИИИС, 2009. — 260 с.
15. Бондарик Г. К., Ярг Л. А. *Инженерная геология: вопросы теории и практики. Философские и методологические основы геологии*. — М.: КДУ, 2015. — 296 с.

16. Васильев В. И., Васильева М. В., Сирдитов И. К., Степанов С. П., Цеева А. Н. Математическое моделирование температурного режима грунтов оснований фундаментов в условиях многолетнемерзлых пород // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана*. — 2017. — № 1 (70). — С. 142–159.
17. Векслер А. Б., Ивашинцов Д. А., Стефанишин Д. В. *Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений: пособие для специалистов*. — СПб.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2002. — 591 с.
18. Гаврильев Р. И., Кузьмин Г. П. Определение теплофизических характеристик мерзлых грунтов расчетным методом // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. — 2009. — № 4.
19. Гаврильев Р. И. *Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны*. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. — 280 с.
20. Галкин А. Н. *Литотехнические системы Белоруссии: закономерности функционирования, мониторинг и инженерно-геологическое обоснование управления*: дис. … д-ра геол.-минерал. наук. — М.: Витебский государственный университет им. П. М. Машерова, 2014.
21. Гарагаш Б. А. *Надежность систем «основание–сооружение»*. — М.: АСВ, 2012.
22. Горелик Я. Б., Паздерин Д. С. Корректность постановки и решения задач по прогнозу динамики температурных полей в основании сооружений на многолетнемерзлых грунтах // *Криосфера Земли*. — 2017. — Т. XXI, № 3. — С. 49–59.
23. Горлов А. А., Фоменко И. К., Наумов М. А. Применение стохастического подхода для оценки сферы влияния реконструируемого сооружения на окружающую застройку // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. — 2026. — Т. 68, № 1. — С. 109–118.
24. Горобцов Д. Н. *Научно-методические основы исследования теплофизических свойств дисперсных грунтов*: дис. … канд. геол.-минерал. наук. — М.: МГРИ, 2011. — 198 с.
25. ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний (с изм. № 1).
26. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация.
27. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения (с изм. № 1).
28. ГОСТ Р 71038-2023. Грунты. Методы лабораторного определения теплофизических характеристик.
29. ГОСТ Р 27.002-2009. Надежность в технике. Термины и определения.

30. Григорьев Б. В. *Замерзание влажных грунтов в равновесных и неравновесных условиях*: автореф. дис. … канд. техн. наук. — 2013. — 20 с.

31. Губарьков А. А., Лейбман М. О., Хомутов А. В. Криогенные процессы в естественных и техногенных условиях на Харасавэйском месторождении // *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. — 2012. — № 4. — С. 21–27.

32. Данилов И. Д. Криолитозона Земли и ее районирование // *Известия АН СССР. Серия географическая*. — 1983. — № 1. — С. 12–18.

33. Дубина М. М., Тесленко Д. К. Инструменты для расчетов термомеханического поведения геотехнических систем // *Материалы IX научно-технической конференции «Актуальные проблемы механики, прочности и теплопроводности при низких температурах»*. — СПб: СПбГУНИПТ, 2003. — С. 102–105.

34. Евланов Д. В. Прогнозирование растепления вечномерзлых грунтов в программе Frost 3D Universal // *Материалы международной научно-практической конференции «Технологии проектирования и строительства фундаментов на вечномерзлых грунтах»*. — М., 2014.

35. Ершов Э. Д. (ред.) *Геокриология СССР. Западная Сибирь*. — М.: Недра, 1989. — 453 с.

36. Ершов Э. Д. (ред.) *Инженерная геокриология*. — М.: Недра, 1991. — 439 с.

37. Ершов Э. Д. (ред.) *Геокриология СССР. Средняя Сибирь*. — М.: Недра, 1989. — 413 с.

38. Ершов Э. Д. *Общая геокриология: учебник для вузов*. — М.: Недра, 1990. — 559 с.

39. Зарецкий Ю. К. *Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений*. — М.: Стройиздат, 1988. — 349 с.

40. Зеркаль О. В., Фоменко И. К., Самарин Е. Н. Вероятностный подход при моделировании устойчивости склонов: реализация и особенности // *Геоэкология*. — 2023. — № 6. — С. 26–38.

41. Истомин В. А., Чувилин Е. М., Буханов Б. А. Ускоренный метод оценки содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах // *Криосфера Земли*. — 2017. — Т. XXI, № 6. — С. 134–139.

42. Кауфман Б. Д. *Оценка надежности гидротехнических сооружений при динамических воздействиях в условиях неполноты исходной информации*: дис. … д-ра техн. наук. — СПб: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2015. — 259 с.

43. Кауфман Б. Д., Шульман С. Г. *Динамика систем «сооружение–основание» при неполной исходной информации (учет случайных и неопределенных факторов)*. — СПб: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2016.

44. Квашук С. В. *Геодинамика Приамурья и проблемы функционирования сети железных дорог*: автореф. дис. … д-ра геол.-минерал. наук. — Хабаровск, 2004.

45. Кияшко Н. В. *Закономерности изменения фазового и химического состава, теплофизических характеристик засоленных пород и криопэгов п-ова Ямал в процессе их криогенного метаморфизма*: дис. … канд. геол.-минерал. наук. — М.: МГУ, 2014. — 138 с.

46. Клещеев К. А., Шеин В. С. *Нефтяные и газовые месторождения России. Книга 2. Азиатская часть России*. — М.: ВНИГНИ, 2010. — 720 с.

47. Колунин В. С., Ишкова З. А. Метод «начала кристаллизации» воды для определения температуры начала замерзания грунтов // *Криосфера Земли*. — 2019. — Т. XXIII, № 6. — С. 3–7.

48. Комаров И. А. *Термодинамика и теплофизика мерзлых пород: учебное пособие*. — М.: Научный мир, 2025. — 632 с.

49. Королев В. А., Трофимов В. Т. *Инженерная геология: история, методология и номологические основы*. — М.: КДУ, 2016. — 292 с.

50. Королев В. А. *Инженерная защита территорий и сооружений: учебное пособие*. — М.: КДУ, 2013. — 470 с.

51. Королев В. А. *Мониторинг геологической среды* / под ред. В. Т. Трофимова. — М.: МГУ, 1995. — 272 с.

52. Королев В. А., Кузнецова Н. В. Оценка состояния литотехнических систем историко-культурных сооружений при обосновании и проведении их мониторинга // *Инженерные изыскания*. — 2015. — № 13. — С. 62–69.

53. Кудрявцев В. А., Достовалов Б. Н., Романовский Н. Н., Кондратьева К. А., Меламед В. Г. *Общее мерзлотоведение (геокриология)*. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: МГУ, 1978. — 464 с.

54. Кудрявцев В. А., Гарагуля Л. С., Булдович С. Н., Мотенко Р. Г. *Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях*. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Геоинфо, 2016. — 512 с.

55. Кудрявцев С. А., Сахаров И. И., Парамонов В. Н. *Промерзание и оттаивание грунтов (практические примеры и конечноэлементные расчеты)*. — СПб: Георекконструкция, 2014.

56. Кургузов К. В. *Стохастическое моделирование литотехнических систем*: дис. … канд. геол.-минерал. наук. — М., 2019. — 161 с.

57. Кургузов К. В., Фоменко И. К., Шубина Д. Д. Вероятностно-статистическое моделирование нагрузок и воздействий // *Вестник МГСУ*. — 2020. — Т. 15, вып. 9. — С. 1249–1261.

58. Лапердин В. К. *Закономерности развития экзогенных геологических процессов в зонах линейных природно-технических систем юга Восточной Сибири*: автореф. дис. … д-ра геол.-минерал. наук. — Иркутск: ИЗК СО РАН, 2003. — 48 с.

59. Ломтадзе В. Д. *Словарь по инженерной геологии*. — СПб: Санкт-Петербургский горный институт, 1999. — 360 с.

60. Маций С. И., Безуглова Е. В., Плешаков Д. В. *Оценка оползневого риска транспортных сооружений: монография*. — Краснодар: КубГАУ, 2015. — 120 с.

61. Мельников В. П., Брушков А. В., Дроздов Д. С. Материалы V конференции геокриологов России: пленарные доклады (14–17 июня 2016 г., МГУ им. М. В. Ломоносова) // *Современные проблемы геокриологии*. — М.: Университетская книга, 2016. — Т. 1. — С. 5–25.

62. Мельников Е. С., Тагунова Л. Н., Лазарева Н. А. *Ландшафты криолитозоны Западно-Сибирской газоносной провинции*. — Новосибирск: Наука, 1983.

63. Наумов М. А., Фоменко И. К. Особенности моделирования глубины оттаивания грунтов от воздействия воды в пруду-накопителе // *Инженерные изыскания в строительстве*: материалы VI Общероссийской науч.-практ. конф. молодых специалистов. — М., 2024. — С. 96–102.

64. Наумов М. А., Фоменко И. К. Сравнительный анализ расчетных методик определения теплопроводности дисперсных грунтов // *Сборник докладов III Международного строительного форума «АРКТИКА»*. — М., 2024. — С. 86–91.

65. Наумов М. А., Фоменко И. К. Дополнительные требования к инженерно-геологическим изысканиям при выполнении теплотехнического моделирования // *Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в РФ*: материалы XIX Общероссийской науч.-практ. конф. — М., 2024. — С. 121–129.

66. Наумов М. А., Фоменко И. К. Использование характеристической кривой влажности для определения теплопроводности грунтов // М.: Изд-во Российского университета транспорта, 2024. — С. 156–160.

67. Наумов М. А., Фоменко И. К. Определение температуры замерзания незасоленных грунтов расчетными методами // *ТТС-24: Технические и технологические системы*: материалы XV Междунар. науч. конф. — Краснодар, 2024. — С. 351–355.

68. Наумов М. А., Фоменко И. К., Волошин В. Р., Гречищева Э. С., Горобцов Д. Н. Модели теплопроводности дисперсных незасоленных мерзлых грунтов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. — 2025. — Т. 67, № 4. — С. 130–141.

69. Наумов М. А., Фоменко И. К., Горобцов Д. Н. Математическое моделирование глубины оттаивания грунтов от воздействия воды в пруду-накопителе // *Инженерная геология*. — 2024. — Т. XIX, № 2. — С. 64–75.

70. Наумов М. А., Фоменко И. К., Горлов А. А., Самарин Е. Н. Стохастический подход к моделированию глубины оттаивания магистрального нефтепровода // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. — 2026. — № 2. — С. 76–84.

71. Нормы и технические условия проектирования естественных оснований и фундаментов зданий и промышленных сооружений в районах вечной мерзлоты (НиТУ 118-54). — 1954.

72. Новгородова М. А., Горобцов Д. Н., Ушаков А. С. Влияние давления всасывания глинистых неполностью водонасыщенных грунтов на устойчивость склона // *Proceedings of Higher Educational Establishments: Geology and Exploration*. — 2024. — Т. 66, № 2. — С. 69–79.

73. НСР ЕН 1990–2011. Еврокод 0. Основы проектирования сооружений. — Офиц. изд. — М., 2011.

74. Павлов А. В., Перльштейн Г. З., Типенко Г. С. Актуальные аспекты моделирования и прогноза термического состояния криолитозоны в условиях меняющегося климата // *Криосфера Земли*. — 2010. — Т. XIV, № 1. — С. 3–12.

75. Пашкин Е. М. *Инженерно-геологическая диагностика деформаций памятников архитектуры*. — 4-е изд., доп. — М.: АНО «Традиция», 2022. — 368 с.

76. Пендин В. В. *Комплексный количественный анализ информации в инженерной геологии*. — М.: КДУ, 2009.

77. Пендин В. В., Ганова С. Д. *Геоэкологический мониторинг территорий расположения объектов транспорта газа в криолитозоне*. — М.: ПНИИИС, 2009. — 236 с.

78. Пендин В. В., Фоменко И. К. *Методология оценки и прогноза оползневой опасности*. — М., 2015. — 320 с.

79. Пономарева О. Е., Гравис А. Г., Бердников Н. М. Динамика криогенных процессов в северной тайге Западной Сибири в условиях меняющегося климата // *Материалы X Международной конференции по мерзлотоведению (TICOP)*. — Тюмень, 2012. — Т. 3. — С. 431–436.

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

81. Примаков С. С., Пульдас Л. А., Забора И. В. Расчет теплового взаимодействия различных сооружений с многолетнемерзлыми грунтами оснований // *Вестник Тюменского*

государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. — 2019. — Т. 5, № 2. — С. 43–58.

82. Примаков С. С., Забора И. В. Определение границ микроклиматических характеристик при расчете параметров теплообмена в процессе адаптации геокриологической модели // *Вестник Тюменского государственного университета*. — 2019. — Т. 5, № 4. — С. 79–97.
83. *Применение математических методов в геокриологии* / под ред. Л. С. Гарагули; Л. С. Гарагуля, Г. С. Типенко, И. А. Комаров и др. — М.: МГУ, 1987. — 168 с.
84. Пустовойт Г. П., Гречищева Э. С., Голубин С. И., Аврамов А. В. Влияние способа получения исходных данных на прогнозные теплотехнические расчеты при проектировании в криолитозоне // *Криосфера Земли*. — 2018. — Т. XXII, № 1. — С. 51–57.
85. Пшеничкин А. П. *Основы вероятностно-статистической теории взаимодействия сооружений с неоднородными грунтовыми основаниями*. — Волгоград: ВолгГАСУ, 2006.
86. Райзер В. Д. *Теория надежности в строительном проектировании*. — М.: АСВ, 1998.
87. РД 39-Р-088–91. Инструкция по определению температурного режима вечномерзлых и сезонномерзлых грунтов и прогнозированию последствий изменения тепловых условий на поверхности. — М.: Миннефтегазпром СССР, 1991.
88. Ревзон А. Л. *Картографирование состояния геотехнических систем*. — М.: Недра, 1992. — 223 с.
89. Ржаницын А. Р. *Теория расчета строительных конструкций на надежность*. — М.: Стройиздат, 1978.
90. Роман Л. Т. *Механика мерзлых грунтов*. — М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2002. — 426 с.
91. Роман Л. Т., Котов П. И., Царапов М. Н. Модуль деформации мерзлых грунтов при компрессионных испытаниях // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. — 2016. — Т. 53, № 5. — С. 357–363.
92. *Российская геологическая энциклопедия*. Т. 2 (К–П). — М.–СПб: ВСЕГЕИ, 2011. — 704 с.
93. РСН 67-87. Инженерные изыскания для строительства. Составление прогноза изменений температурного режима вечномерзлых грунтов численными методами.
94. Савельев Б. А. *Физико-химическая механика мерзлых пород*. — М.: Недра, 1989. — 211 с.
95. Сегерлинд Л. *Применение метода конечных элементов*. — М.: Мир, 1979. — 392 с.
96. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Свод правил (с изм. № 1, 2).
97. СП 493.1325800.2020. Инженерные изыскания для строительства в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. Общие требования. Свод правил.

98. СП 86.13330.2022. Магистральные трубопроводы. Свод правил.

99. *Терминологический словарь по инженерной геологии* / под ред. Г. Кэбеля, А. Томаса. — Берлин: Akad.-Verl, 1973.

100. Тихонов А. Н., Самарский А. А. *Уравнения математической физики*. — М.: Наука, 1972. — 736 с.

101. Ткаченко Е. И. *Исследование тепловых задач для сред с изменением агрегатного состояния на основе новой формулировки нижнего граничного условия*: дис. … канд. техн. наук. — Тюмень: Тюменский государственный университет, 2006.

102. *Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме*. — СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. — 124 с.

103. Трофимов В. Т., Зилинг Д. Г. *Экологическая геология: учебник*. — М.: Геоинформмарк, 2002. — 415 с.

104. Тыртиков А. П. *Динамика растительного покрова и развитие мерзлотных форм рельефа*. — М.: Наука, 1979. — 116 с.

105. Ушаков И. А. *Курс теории надежности систем: учебное пособие*. — М.: Дрофа, 2008. — 239 с.

106. Фельдман Г. М., Тетельбаум А. С., Шендер Н. И. и др. *Пособие по прогнозу температурного режима грунтов Якутии*. — Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1988. — 240 с.

107. Хрусталев Л. Н., Пустовойт Г. П. *Вероятностно-статистические расчеты оснований зданий в криолитозоне* / отв. ред. П. И. Мельников. — Новосибирск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1988. — 249 с.

108. Хрусталев Л. Н. *Основы геотехники в криолитозоне: учебник*. — М.: ИНФРА-М, 2024. — 543 с.

109. Хрусталев Л. Н., Давыдова И. В. Прогноз потепления климата и его учет при оценке надежности оснований зданий на вечномерзлых грунтах // *Криосфера Земли*. — 2007. — Т. 11, № 2. — С. 68–75.

110. Цернант А. А. *Сооружение земляного полотна в криолитозоне*: автореф. дис. … д-ра техн. наук. — М.: НИИ транспортного строительства, 1998. — 97 с.

111. Цытович Н. А. *Механика мерзлых грунтов: учебное пособие*. — М.: Высшая школа, 1973. — 448 с.

112. Чеверев В. Г., Видяпин И. Ю., Кондаков М. В., Мотенко Р. Г. Определение содержания незамерзшей воды в грунтах по изотермам сорбции-десорбции // *Криосфера Земли*. — 2005. — Т. 9, № 4. — С. 29–33.

113. Чеверев В. Г., Сафронов Е. В., Алексеев А. Г., Гречищева Э. С. Лабораторные методы определения теплофизических характеристик мерзлых и талых грунтов: аналитический обзор // *Инженерная геология*. — 2022. — Т. XVII, № 1. — С. 64–72.

114. Чувилин Е. М., Соколова Н. С., Буханов Б. А., Истомин В. А., Мингареева Г. Р. Определение температуры начала замерзания грунтов на основе измерения потенциала поровой воды // *Криосфера Земли*. — 2020. — Т. XXIV, № 6. — С. 11–20.

115. Чудновский А. Ф. *Теплофизические характеристики дисперсных материалов*. — М.: Физматгиз, 1962.

116. Шашкин К. Г. Использование структуры универсального конечного элемента при разработке моделей в рамках программы «FEM models» // *Реконструкция городов и геотехническое строительство*. — 2000. — № 2. — С. 26–32.

117. Шлыков В. Г. *Рентгеновский анализ минерального состава дисперсных грунтов*. — М.: ГЕОС, 2006. — 176 с.

118. Шпете Г. *Надежность несущих строительных конструкций*. — М.: Стройиздат, 1994.

119. Шульман Г. С., Романов М. В. *Надежность инженерных сооружений: учебное пособие*. — СПб: СПбГТУ, 2001. — 48 с.

120. Agergaard F., Ingeman-Nielsen T. Development of bearing capacity of fine-grained permafrost deposits in western Greenland urban areas subject to soil temperature changes // *Cold Regions Engineering*. — 2012. — P. 82–92.

121. Ahmadabadi M., Poisel R. Assessment of the application of point estimate methods in the probabilistic stability analysis of slopes // *Computers and Geotechnics*. — 2015. — Vol. 69. — P. 540–550.

122. Akagawa S., Nishisato K. Tensile strength of frozen soil in the temperature range of the frozen fringe // *Cold Regions Science and Technology*. — 2009. — Vol. 57, No. 1. — P. 13–22.

123. Andersland O., Ladanyi B. *Frozen Ground Engineering*. — 2nd ed. — Hoboken: Wiley, 2004.

124. Anderson D. M., Tice A. R. Predicting unfrozen water contents in frozen soils from surface area measurements // *Highway Research Board*. — 1972. — No. 393. — P. 12–18.

125. Anderson R., Tohidi B., Webber J. B. W. Gas hydrate growth and dissociation in narrow pore networks: Capillary inhibition and hysteresis phenomena // *Geological Society, London, Special Publications*. — 2009. — Vol. 319, No. 1. — P. 145–159.

126. Azmatch T. F., Sego D. C., Arenson L. U., Biggar K. W. Using soil freezing characteristic curve to estimate the hydraulic conductivity function of partially frozen soils // *Cold Regions Science and Technology*. — 2012. — Vol. 83. — P. 103–109.

127. Balland V., Arp P. A. Modeling soil thermal conductivities over a wide range of conditions // *Journal of Environmental Engineering and Science*. — 2005. — Vol. 4, No. 6. — P. 549–558.

128. Becker B. R., Misra A., Fricke B. A. Development of correlations for soil thermal conductivity // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. — 1992. — Vol. 19, No. 1. — P. 59–68.

129. Berg R. L., Bigl S. R., Stark J. A., Durell G. D. Resilient modulus testing of materials from Mn/ROAD. — Hanover, NH: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1996. — (CRREL Report 96-19).

130. Bi J., Wang G., Wu Z., Wen H., Zhang Y., Lin G., Sun T. Investigation on unfrozen water content models of freezing soils // *Frontiers in Earth Science*. — 2023.

131. Biskaborn B. K., Smith S. L., Noetzli J. et al. Permafrost is warming at a global scale // *Nature Communications*. — 2019. — Vol. 10. — Article No. 264. — P. 1–11.

132. Bittelli M., Flury M., Campbell G. S. A thermodielectric analyzer to measure the freezing and moisture characteristic of porous media // *Water Resources Research*. — 2003. — Vol. 39, No. 2.

133. Brooks R.H., Corey A.T. Hydraulic properties of porous media // Transactions of the ASAE. — 1964. — Vol. 7, № 1. — P. 1–27.

134. Burland J. B. Closing session discussions // *Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils*. — Paris: A. A. Balkema, 1996. — Vol. 3. — P. 1562.

135. Christian J. T., Baecher G. B. Point-estimate method as numerical quadrature // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. — 2001. — Vol. 125. — P. 779–786.

136. Côté J., Konrad J.-M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials // *Canadian Geotechnical Journal*. — 2005. — Vol. 42. — P. 443–458.

137. Cox M. P., Betts A. R., Bunton B. C., Essery H. R. L., Rowntree R. P., Smith J. The impact of new land surface physics on the GCM simulation of climate and climate sensitivity // *Climate Dynamics*. — 1999. — Vol. 15, No. 3. — P. 183–203.

138. De Vries D. A. Thermal properties of soil // *Physics of Plant Environment* / ed. by W. R. van Dijk. — Amsterdam: North-Holland Publishing, 1963. — P. 210–235.

139. Desborough C. E., Pitman A. J. The BASE land surface model // *Global and Planetary Change*. — 1998. — Vol. 19. — P. 3–18.

140. Dong Y., McCartney J. S., Lu N. Critical review of thermal conductivity models for unsaturated soils // *Geotechnical and Geological Engineering*. — 2015. — Vol. 33, No. 2. — P. 207–221.

141. Einstein H. H., Baecher G. B. Probabilistic and statistical methods in engineering geology: problem statement and introduction to solution // *Rock Mechanics*. — 1982. — Suppl. 12. — P. 47–62.

142. Einstein H. H., Baecher G. B. Probabilistic and statistical methods in engineering geology // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. — 1983. — Vol. 16, No. 1. — P. 39–72.

143. *Engineer Technical Letter 1110-2-547*. Engineering and design: Introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering. — Washington, DC: Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, 1997.

144. Farouki O. *Evaluation of methods for calculating soil thermal conductivity*. — Hanover, NH: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1982.

145. Farouki O. *Thermal properties of soils*. — Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1986. — Vol. 11. — 136 p. — (Series on Rock and Soil Mechanics).

146. Fedorov K. Depression of soil moisture freezing point as a thermodynamic parameter // *Proceedings of the Frost in Geotechnical Engineering*. — VTT Symposium 94. — 1989. — P. 239–250.

147. Fendy N., Ismail R. Mineralogy and geochemistry of clay in Sokor and Jeli, Kelantan // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — 2022. — Vol. 1102. — Article No. 012024.

148. Fenton G. A., Griffiths D. V. *Risk assessment in geotechnical engineering*. — Hoboken, NJ: Wiley, 2008.

149. Fredlund D. G., Rahardjo H., Fredlund M. D. *Unsaturated soil mechanics in engineering practice*. — Hoboken, NJ: Wiley, 2012.

150. Fredlund D. G., Rahardjo H. *Soil mechanics for unsaturated soils*. — Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1993.

151. Fukuda M., Kim H., Kim Y. Preliminary results of frost heave experiments using standard test sample provided by TC8 // *Ground Freezing 97*. — Luleå: Balkema, 1997. — P. 25–30.

152. Goodrich L. E., Gold L. W. Ground thermal analysis // *Permafrost: Engineering Design and Construction* / ed. by G. H. Johnston. — New York: Wiley, 1981. — Ch. 4.

153. Grant S. A., Sletten R. S. Calculating capillary pressures in frozen and ice-free soils below the melting temperature // *Environmental Geology*. — 2002. — Vol. 42, No. 2–3. — P. 130–136.

154. Hansson K., Šimůnek J., Mizoguchi M., Lundin L.-C., van Genuchten M. T. Water flow and heat transport in frozen soil: numerical solution and freeze–thaw applications // *Vadose Zone Journal*. — 2004. — Vol. 3, No. 2. — P. 693–704.

155. Harlan R., Nixon J. Ground thermal regime // *Geotechnical Engineering for Cold Regions* / ed. by O. B. Andersland, D. M. Anderson. — New York: McGraw-Hill, 1978. — Ch. 3. — P. 103–163.

156. Harr M. E. *Reliability-based design in civil engineering*. — New York: McGraw-Hill, 1987.

157. He H., Dyck M. Application of multiphase dielectric mixing models for understanding the effective dielectric permittivity of frozen soils // *Vadose Zone Journal*. — 2013. — Vol. 12, No. 1. — P. 1–22.

158. He H., Flerchinger G. N., Kojima Y., Dyck M., Lv J. A review and evaluation of 39 thermal conductivity models for frozen soils // *Geoderma*. — 2021. — Vol. 382. — Article No. 114694.

159. He H., He D., Jin J., Smits K. M., Dyck M., Wu Q., Lv J. Room for improvement: A review and evaluation of 24 soil thermal conductivity parameterization schemes commonly used in land-surface, hydrological, and soil–vegetation–atmosphere transfer models // *Earth-Science Reviews*. — 2020. — Vol. 211.

160. *Heat and mass transfer modeling with GeoStudio*. — 2nd ed. — Calgary: Geo-Slope International Ltd., 2018.

161. Jame Y. W. *Heat and mass transfer in freezing soil*: PhD thesis. — Saskatoon: University of Saskatchewan, 1977.

162. Johansen O. *Thermal conductivity of soils*. — Hanover, NH: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1977. — (CRREL Report TL-637).

163. Johnston G. H., Ladanyi B., Morgenstern N. R., Penner E. *Permafrost: Engineering design and construction*. — Toronto: Wiley, 1981. — 540 p.

164. Cetin K. O., Koprivica S., Jeremić B. Soil uncertainty and its influence on simulated G/Gmax and damping behavior // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. — 2010.

165. Kersten M. S. *Thermal properties of soils*. — Minneapolis: University of Minnesota, Institute of Technology, 1949.

166. Knutsson S. *Thermal properties of bentonite-based barriers*: Licentiate thesis. — Luleå: Luleå University of Technology, 1985.

167. Kong L., Wang Y., Sun W., Qi J. Influence of plasticity on unfrozen water content of frozen soils as determined by nuclear magnetic resonance // *Cold Regions Science and Technology*. — 2020. — Vol. 172. — Article No. 102993.

168. Konrad J.-M. Cold region engineering // *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook*. — Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001. — P. 591–613.

169. Kozlowski T. A semi-empirical model for phase composition of water in clay–water systems // *Cold Regions Science and Technology*. — 2007. — Vol. 49, No. 3. — P. 226–236.

170. Kurylyk B. L., Watanabe K. The mathematical representation of freezing and thawing processes in variably saturated, non-deformable soils // *Advances in Water Resources*. — 2013. — Vol. 60. — P. 160–177.

171. Lawrence D. M., Slater A. G. Incorporating organic soil into a global climate model // *Climate Dynamics*. — 2008. — Vol. 30, No. 2–3. — P. 145–160.

172. Lebeau M., Konrad J.-M. Natural convection of compressible and incompressible gases in undeformable porous media under cold climate conditions // *Computers and Geotechnics*. — 2009. — Vol. 36. — P. 435–445.

173. Li J., Wu T., Lu Z., Wu S. Investigation into mining economic evaluation approaches based on the Rosenblueth point estimate method // *Applied Sciences*. — 2023. — Vol. 13. — P. 9011.

174. Liu W. M., He P., Zhang Z. A calculation method of thermal conductivity of soils (in Chinese with English abstract) // *Journal of Glaciology and Geocryology*. — 2002. — Vol. 24, No. 6. — P. 770–774.

175. Liu Z., Yu X. Physically based equation for phase composition curve of frozen soils // *Transportation Research Record*. — 2013. — No. 2349. — P. 93–99.

176. Lu Y., Yu W., Hu D., Liu W. Experimental study on the thermal conductivity of aeolian sand from the Tibetan Plateau // *Cold Regions Science and Technology*. — 2018. — Vol. 146. — P. 1–8.

177. Luo S. Q., Lv S. H., Zhang Y., Hu Z. Y., Ma Y. M., Li S. S., Shang L. Y. Soil thermal conductivity parameterization establishment and application in numerical model of central Tibetan Plateau (in Chinese with English abstract) // *Chinese Journal of Geophysics*. — 2009. — Vol. 52. — P. 919–928.

178. Mao Y., Romero Morales E. E., Gens A. Ice formation in unsaturated frozen soils // *Proceedings of the 7th International Conference on Unsaturated Soils (UNSAT 2018)*. — Hong Kong, 2018. — P. 597–602.

179. Mirghafari R., Helforoosh A., Nikooee E., Habibagahi G., Raoof A., van Genuchten M. Pore unit cell network modeling of the thermal conductivity dynamics in unsaturated sandy soils: unveiling the role of spanning-wetting phase cluster // *Vadose Zone Journal*. — 2024.

180. Mu Q. Y., Ng C. W. W., Zhou C., Zhou G. G. D., Liao H. J. A new model for capturing void ratio-dependent unfrozen water characteristics curves // *Computers and Geotechnics*. — 2018. — Vol. 101. — P. 95–99.

181. Muller S. Frozen in time: permafrost and engineering problems // *Permafrost and Engineering Problems* / ed. by H. M. French, F. E. Nelson. — Reston, VA: ASCE, 2008.

182. Na S. *Multiscale thermo-hydro-mechanical-chemical coupling effects for fluid-infiltrating crystalline solids and geomaterials: theory, implementation, and validation*: doctoral dissertation. — New York: Columbia University, 2018.

183. Nishimura S., Gens A., Olivella S., Jardine R. J. THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application // *Géotechnique*. — 2009. — Vol. 59, No. 3. — P. 159–171.

184. Orakoglu Firat M. E. Experimental study and modelling of the thermal conductivity of frozen sandy soil at different water contents // *Measurement*. — 2021. — Vol. 181.

185. Painter S. L. Three-phase numerical model of water migration in partially frozen geological media: model formulation, validation, and applications // *Computational Geosciences*. — 2011. — Vol. 15, No. 1. — P. 69–85.

186. Pei W., Yu W., Li S., Zhou J. A new method to model the thermal conductivity of soil–rock media in cold regions: an example from permafrost regions tunnel // *Cold Regions Science and Technology*. — 2013. — Vol. 95. — P. 11–18.

187. Penner E. Thermal conductivity of frozen soils // *Canadian Journal of Earth Sciences*. — 1970. — Vol. 7, No. 3. — P. 982–987.

188. Peters-Lidard C. D., Blackburn E., Liang X., Wood E. F. The effect of soil thermal conductivity parameterization on surface energy fluxes and temperatures // *Journal of the Atmospheric Sciences*. — 1998. — Vol. 55, No. 7. — P. 1209–1224.

189. Phoon K.-K. *Reliability-based design in geotechnical engineering*. — London; New York: Taylor & Francis, 2008.

190. Ren J., Vanapalli S. K., Han Z. Soil freezing process and different expressions for the soil-freezing characteristic curve // *Science of Cold and Arid Regions*. — 2017. — Vol. 9, No. 3. — P. 221–228.

191. Richards L.A. Capillary conduction of liquids through porous mediums // Physics. — 1931. — Vol. 1, № 5. — P. 318–333.

192. Rosenblueth E. Point estimates for probability moments // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. — 1975. — Vol. 72, No. 10. — P. 3812–3814.

193. Różański A., Kaczmarek N. Empirical and theoretical models for prediction of soil thermal conductivity: a review and critical assessment // *Studia Geotechnica et Mechanica*. — 2020. — P. 1–11.

194. *RS2 Thermal Analysis: Theory Manual*. — Toronto: Rocscience, 2022.

195. Saito H., Šimůnek J. Effects of meteorological models on the solution of the surface energy balance and soil temperature variations in bare soils // *Journal of Hydrology*. — 2009. — Vol. 373. — P. 545–561.

196. Sass J. H., Lachenbruch A. H., Munroe R. J. Thermal conductivity of rocks from measurements on fragments and its application to heat-flow determinations // *Journal of Geophysical Research*. — 1971. — Vol. 76, No. 14. — P. 3391–3401.

197. Sekhavatian A., Janalizadeh Choobbasti A. Comparison of point estimate and Monte Carlo probabilistic methods in stability analysis of a deep excavation // *International Journal of Geo-Engineering*. — 2018. — Vol. 9, No. 1.

198. Sepaskhah A. R., Tabarzad A., Fooladmand H. R. Physical and empirical models for estimation of specific surface area of soils // *Archives of Agronomy and Soil Science*. — 2010. — Vol. 56, No. 3. — P. 325–335.

199. Shmakin A. B. The updated version of SPONSOR land surface scheme: PILPS-influenced improvements // *Global and Planetary Change*. — 1998. — Vol. 19, No. 1. — P. 49–62.

200. Spaans E. J., Baker J. M. The soil freezing characteristic: its measurement and similarity to the soil moisture characteristic // *Soil Science Society of America Journal*. — 1996. — Vol. 60. — P. 13–19.

201. Tan L., Wei C., Tian H., Zhou J., Wei H. Experimental study of unfrozen water content of frozen soils by low-field nuclear magnetic resonance // *Rock and Soil Mechanics*. — 2015. — Vol. 36, No. 6. — P. 1566–1572.

202. Tarnawski V. R., Momose T., Leong W. H. Assessing the impact of quartz content on the prediction of soil thermal conductivity // *Géotechnique*. — 2009. — Vol. 59, No. 4. — P. 331–338.

203. Teng J., Dong A., Zhang S., Zhang X., Sheng D. Freezing–thawing hysteretic behavior of soils // *Water Resources Research*. — 2024. — Vol. 60.

204. Tian H., Wei C., Wei H., Zhou J. Freezing and thawing characteristics of frozen soils: bound water content and hysteresis phenomenon // *Cold Regions Science and Technology*. — 2014. — Vol. 103. — P. 74–81.

205. Tian Z., Lu Y., Horton R., Ren T. A simplified de Vries-based model to estimate thermal conductivity of unfrozen and frozen soil // *European Journal of Soil Science*. — 2016. — Vol. 67, No. 5. — P. 564–572.

206. van Genuchten M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // *Soil Science Society of America Journal*. — 1980. — Vol. 44, No. 5. — P. 892–898.

207. Vanapalli S. K., Fredlund D. G., Pufahl D. E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till // *Géotechnique*. — 1999. — Vol. 49, No. 2. — P. 143–159.

208. Verseghy D. L. CLASS — a Canadian land surface scheme for GCMs. I. Soil model // *International Journal of Climatology*. — 1991. — Vol. 11, No. 2. — P. 111–133.

209. Vrouwenvelder A. C. W. M. JCSS probabilistic model code // *Proceedings of the International Conference on Safety, Risk and Reliability Trends in Engineering*. — Switzerland, 2001. — P. 65–70.

210. Wang L., Zhou J., Qi J., Sun L., Yang K., Tian L., Lin Y., Liu W., Shrestha M., Xue Y., Koike T., Ma Y., Li X., Chen Y., Chen D., Piao S., Lu H. Development of a land surface model with coupled snow and frozen soil physics // *Water Resources Research*. — 2017. — Vol. 53, No. 6. — P. 5085–5103.

211. Wen H., Bi J., Guo D. Evaluation of the calculated unfrozen water contents determined by different measured subzero temperature ranges // *Cold Regions Science and Technology*. — 2020. — Vol. 170.

212. Wu Y., Wang Y., Hu L. A theoretical model of the soil freezing characteristic curve for saline soil // *Journal of Hydrology*. — 2023. — Vol. 622, Part A. — Article No. 129639.

213. Xin Q., Yang T., She X., Gao Y., Cao Y. Experimental and modeling investigation of thermal conductivity of Shenyang silty clay under unfrozen and frozen states by Hot Disk method // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. — 2022. — Vol. 132.

214. Song X., Vanapalli S. K., Ren J. Prediction of thermal conductivity of frozen soils from basic soil properties using ensemble learning methods // *Geoderma*. — 2024. — Vol. 450.

215. Yamazaki Y., Tsuchiya F., Tsuji O. Measurement and estimation of thermal conductivity of quartz-containing frozen and unfrozen soils (in Japanese with English abstract) // *Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*. — 2003. — No. 226. — P. 497–505.

216. Yu L., Zeng Y., Wen J., Su Z. Liquid–vapor–air flow in frozen soil // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 2018. — Vol. 123, No. 14. — P. 7393–7415.

217. Zapata C. E. *Uncertainty in soil-water characteristic curve and impacts on unsaturated shear strength predictions*: PhD dissertation. — Tempe, AZ: Arizona State University, 1999.

218. Zhang N., Wang Z. Review of soil thermal conductivity and predictive models // *International Journal of Thermal Sciences*. — 2017. — Vol. 117. — P. 172–183.

219. Zhang M., Lu J., Lai Y., Zhang X. Variation of the thermal conductivity of a silty clay during a freezing–thawing process // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 2018. — Vol. 124. — P. 1059–1067.

220. Zhang S., Teng J., He Z., Liu Y., Liang S., Yao Y., Sheng D. Canopy effect caused by vapour transfer in covered freezing soils // *Géotechnique*. — 2016. — Vol. 66, No. 11. — P. 927–940.

221. Zhou J. *Experimental study on characteristics of unfrozen water in clay mineral and its effect on sand thawing characteristics*. — Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.