

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



*На правах рукописи*

**ШАСТУНОВА УЛЬЯНА ЮРЬЕВНА**

**ТЕПЛОМАССОБМЕН В СИСТЕМЕ  
«ГОРЯЧИЙ РЕЗЕРВУАР – ОСНОВАНИЕ - МЕРЗЛЫЙ ГРУНТ»**

Специальность 01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
доктор физико-математических  
наук, профессор Кислицын А.А.

Тюмень – 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>4</b>
<b>ГЛАВА I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ «ВЕРТИКАЛЬНЫЙ СТАЛЬНОЙ РЕЗЕРВУАР – МЕРЗЛЫЙ ГРУНТ - ОСНОВАНИЕ» (ОБЗОР ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ)</b> .....	<b>11</b>
1.1 Описание объектов исследования и системный анализ аварийных ситуаций при эксплуатации резервуаров .....	12
1.2 Теплофизические процессы, происходящие в резервуарах в зимнее время.....	19
1.2.1 Обзор методик расчета теплового режима резервуара в зимнее время .....	22
1.3. Фундаменты и основания резервуаров.....	25
1.3.1. Мерзлые грунты. Теплофизические процессы, происходящие в мерзлых грунтах-основаниях под «горячими» резервуарами в зимнее время.....	28
1.3.2. Процесс передачи тепла в грунт-основание от резервуара, заполненного горячей жидкостью.....	33
1.3.3. Обзор методик расчета температурного поля мерзлого грунта и глубины сезонного протаивания под резервуаром в зимнее время.....	36
Выводы по главе I.....	40
<b>ГЛАВА II. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ В ГРУНТЕ</b> .....	<b>42</b>
2.1 Экспериментальное исследование нестационарных тепловых режимов в грунте.....	42
2.2 Описание экспериментальной установки и системы измерения .....	43
2.3 Порядок и методика обработки результатов измерений.....	48
2.4 Нестационарные температурные поля в резервуаре и грунте.....	52
Выводы по главе II .....	73

<b>ГЛАВА III. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В РЕЗЕРВУАРАХ .....</b>	<b>75</b>
3.1 Расчет температуры теплоносителя при эксплуатационных режимах резервуара .....	75
3.2 Описание методики по расчету коэффициентов теплопередачи через стенки резервуара .....	82
3.3 Тепловой режим гидравлических испытаний резервуара вертикального стального объемом 20 000 м <sup>3</sup> .....	93
3.4 Расчет теплообменного аппарата для поддержания постоянной температуры мазута в мазутохранилище на Тюменской ТЭЦ - 2 .....	103
Выводы по главе III.....	113
<b>ГЛАВА IV. АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В РЕЗЕРВУАРЕ .....</b>	<b>115</b>
4.1 Задача Стефана .....	115
4.2 Двумерная задача Стефана (Stefan) в цилиндрических координатах $r, x$ в классической постановке без учета конвекции.....	118
4.3 Двумерная задача Стефана (Stefan) в цилиндрических координатах $r, x$ в классической постановке с учетом конвекции .....	122
Выводы по главе IV.....	126
<b>ГЛАВА V. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ «РЕЗЕРВУАР – ОСНОВАНИЕ-ГРУНТ».....</b>	<b>127</b>
5.1 Физико-математическая модель системы «резервуар – основание – мерзлый грунт».....	129
5.2 Численная реализация модели нестационарного тепломассообменного процесса в системе «резервуар – основание – грунт».....	134
5.3 Выводы по главе V.....	138
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>139</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>140</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность темы.** Согласно 1 принципу строительства на многолетнемерзлой породе (далее - ММП) важно сохранять грунт в мерзлом состоянии в течение всего периода эксплуатации сооружения.

В связи с этим особую актуальность приобретает изучение процессов теплопереноса в грунтах и их взаимодействие с инженерными конструкциями. Важно решать совместную задачу «окружающая среда – сооружение - грунт».

Большинство современных моделей теплопереноса в ММП не учитывают все значимые факторы, а именно наличие ветра, солнечной радиации, тепловые режимы работы инженерной конструкции, многослойность фундамента, свойства мерзлой породы в основании и другие. Также не рассматривают взаимного теплового влияния грунта и конструкции, не учитывают миграцию поровой влаги и возникающий с ней конвективный перенос тепла.

Недостаточная изученность влияния обозначенных факторов на точность прогнозных расчетов не позволяет в полной мере гарантировать безопасность и надежность при эксплуатации сооружения. В связи с этим актуальными является задача решения системы уравнений теплопереноса в системе «инженерная конструкция – основание» с учетом основных значимых факторов. Значима также задача экспериментального исследования процессов оттаивания и замерзания мерзлой породы под горячим объектом с целью дальнейшего сопоставления с адекватностью предлагаемой физико-математической модели.

**Цель и задачи работы.** Объектом исследования является нефтехранилище, а именно резервуары стальные вертикальные, стоящие на многолетнемерзлом грунте.

Целью работы является совершенствование физико-математической модели, описывающей процессы тепломассопереноса в мерзлом грунте под инженерной конструкцией, в части учета конвективного переноса тепла поровой влагой при растеплении ММП под «горячим» резервуаром, с целью повышения надежности эксплуатации резервуарных парков в сложных геокриологических условиях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Обосновать необходимость изменения физико-математической модели, учитывающей как можно больше факторов, для уточнения результатов теплотехнических расчетов и оценки ореола протаивания ММП под горячим резервуаром.

2. Создать экспериментальную установку для изучения ореола оттаивания мерзлого грунта под горячим резервуаром и выявлении необходимости учета конвективной составляющей при решении задачи Стефана о протаивании мерзлого грунта.

3. Получить результаты приближенного решения (аналитический способ) двумерной задачи Стефана о протаивании мерзлого грунта с учетом конвективного переноса тепла. Сопоставить их с экспериментальными данными.

4. Разработать численную физико-математическую модель, описывающую процессы тепломассопереноса как в резервуаре, так и в мерзлом грунте под нефтехранилищем с учетом конвективного переноса тепла свободной поровой влаги после растепления.

5. Провести серию теплотехнических расчетов с целью изучения значительного влияния составляющей конвективного переноса тепла на ореол оттаивания в мерзлом грунте.

**Научная новизна исследований** представлена следующими положениями:

1. Экспериментально подтверждено ранее обнаруженное возникновение конвективного теплопереноса талой водой, что приводит к деформации фронта протаивания и ускоряет его движение. Оценка числа Рэлея подтверждает возможность возникновения конвективных потоков в талой зоне. Оценка числа Пекле согласуется с экспериментально найденным увеличением скорости движения фронта протаивания.

2. Экспериментально получены температурные поля в мерзлом грунте при заполнении резервуара горячим теплоносителем (нефтью), изменение формы и положения фронта плавления льда (изотермы  $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) с течением времени. Показано существенное влияние на нулевую изотерму наличия в поровом пространстве грунта свободной воды и ее движения.

3. Впервые представлено приближенное решение двумерной задачи Стефана о протаивании мерзлого грунта с учетом конвективного переноса тепла. Полученное решение находится в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными.

4. Впервые на основании уравнения теплового баланса выведены уравнения, которые позволяют в зависимости от режима эксплуатации резервуара любого объема, определять изменение температуры теплоносителя от таких параметров как скорость ветра, производительность насоса, время заполнения и хранения и др.

5. Представлена методика определения коэффициента теплопередачи и алгоритм расчета температуры теплоносителя позволяет оценивать тепловые потери через ограждающую конструкцию резервуара.

6. Впервые предложена и изучена новая физико-математическая модель, описывающая тепломассоперенос в системе «мерзлый грунт-основание – горячий резервуар», учитывающая конвективный перенос свободной поровой влаги после оттаивания грунта под горячим резервуаром. Новизна модели заключается в том, что теплофизическая

задача решается в совместной постановке: расчетные данные, полученные после технического расчета теплового режима резервуара, при разных способах эксплуатации, используются как исходные данные для теплотехнического расчета ореола оттаивания под резервуаром. Решение задачи в такой постановке учитывает взаимное влияние элементов системы «горячий резервуар – мерзлый грунт».

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Экспериментальная установка и методика измерений движения свободной воды в оттаившем грунте под горячим резервуаром.

2. Установленный факт существенного влияния конвективной составляющей в уравнении теплопроводности при решении задачи Стефана на параметры теплотехнического взаимодействия горячего резервуара с протаивающими грунтами.

3. Методика и результаты расчетного анализа теплового взаимодействия горячего резервуара с протаивающими грунтами.

4. Физико-математическая модель и результаты расчетного анализа тепломассопереноса в системе «резервуар – основание – мерзлый грунт».

**Практическая значимость работы** состоит в следующем:

Полученные результаты дополняют имеющиеся представления о теплофизических процессах, протекающих в мерзлом грунте при эксплуатации инженерных сооружений в районах Крайнего Севера на структурно-неустойчивых грунтах и дают возможность учесть совокупность факторов и внести уточнения в процесс моделирования тепловой задачи в системе «конструкция – основание -мерзлый грунт».

Разработана физико-математическая модель тепломассопереноса в системе «горячий резервуар – основание – мерзлый грунт» и методика расчета теплового взаимодействия резервуара с горячим теплоносителем на мерзлый грунт. Данные теплотехнического расчета теплового режима

резервуара используются как исходные данные для решения системы уравнений, описывающих теплоперенос в мерзлом грунте.

При решении задачи Стефана в уравнении теплопроводности для талой зоны учитывается дополнительный источник тепла, который вызван конвективным переносом тепла свободной поровой воды. Данная методика может быть использована при модернизации существующих программных комплексов, предназначенных для проектирования нефтехранилищ на структурно неустойчивых грунтах.

Разработана экспериментальная установка, позволяющая изучать тепловые процессы, происходящие в мерзлом грунте, при влиянии на мерзлый грунт теплового потока от инженерной конструкции.

**Достоверность** полученных результатов и выводов обеспечена использованием в экспериментальных исследованиях современных методов измерений и компьютерной техники; основана на использовании фундаментальных уравнений теплофизики; обусловлена корректной постановкой задач; подтверждается достаточной обоснованностью принятых допущений и обеспечена количественным совпадением полученных численных решений с известными аналитическими зависимостями и экспериментальными данными.

**Личный вклад автора** состоит в создании экспериментальной установки и проведении экспериментальных исследований по определению влияния конвективного переноса тепла свободной поровой водой в мерзлых грунтах, обработке полученных результатов, разработке методики решения задачи теплового взаимодействия резервуара на мерзлый грунт в совместной постановке задачи, разработке физико-математической модели теплопереноса в системе «горячий резервуар – основание – мерзлый грунт». В опубликованных совместно с соавторами научных статьях вклад соавторов равнозначен.



Автор выражает огромную признательность своему научному руководителю д-ру физ.-мат. наук, проф. Анатолию Александровичу Кислицыну и научному консультанту проф., канд. техн. наук Геннадию Викторовичу Бахмату за терпение и поддержку, а также заведующему кафедрой механики многофазных систем, д-ру техн. наук, профессору Александру Борисовичу Шабарову за ценные научные комментарии и рекомендации по выполнению диссертационной работы.

**Апробация работы.** Результаты исследований докладывались и обсуждались на российских и международных межотраслевых научных семинарах и конференциях. Их перечень приведен ниже.

1. Международная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Стратегия инновационного развития, строительства и освоения районов Крайнего Севера», посвященная 20-летию ООО НПО «Фундаментстройаркос» (Тюмень, 2011 г.).

2. Международная научно-практическая конференция «Наука сегодня» (Вологда, 2015).

3. Региональный конкурс студенческих научных работ – 2015, ТюмГНГУ (Тюмень, 2015 г.).

4. Международная научно-практическая конференция «Достижения и проблемы современной науки» (Уфа, 2016 г.).

5. X-я школа-семинар «Теплофизика, гидрогазодинамика и инновационные технологии» под руководством заслуженного деятеля науки, д-ра техн. наук, проф. А.Б. Шабарова (Тюмень, 2016).

6. Научный семинар кафедры механики многофазных систем ТюмГУ (Тюмень, 2011, 2013, 2016, 2018 гг.).

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 13 работах, в том числе в 2 статьях, входящих в перечень ВАК, и 3 публикациях в изданиях, входящих в международные базы данных.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы. Материал изложен на 139 страницах, включает 44 рисунка, 13 таблиц. Список цитируемой литературы составлен из 118 источников.

## **ГЛАВА I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ «ВЕРТИКАЛЬНЫЙ СТАЛЬНОЙ РЕЗЕРВУАР – МЕРЗЛЫЙ ГРУНТ - ОСНОВАНИЕ» (ОБЗОР ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ)**

В России 80% разведанных запасов нефти сосредоточено в районах распространения вечной мерзлоты.

Опыт строительства и эксплуатации объектов нефтегазового комплекса на мерзлых грунтах показывает, что классические технические решения абсолютно непригодны и порой даже расточительны в финансовом отношении [1]. Очевидна необходимость дополнительных исследований, тепловых расчетов, разработки и применения новых технических решений с учетом долгосрочных прогнозов и управлением температурным режимом грунтов оснований, способных компенсировать отрицательное воздействие потепления для существующих, строящихся и проектируемых сооружений.

Исходя из вышесказанного, можно утверждать, что исследование теплового режима резервуаров на мерзлых грунтах в зимнее время является актуальным вопросом по сохранению прочности и надежности резервуарного парка ТЭК России и требует детального рассмотрения.

## **1.1 Описание объектов исследования и системный анализ аварийных ситуаций при эксплуатации резервуаров**

Наша страна занимает одно из ведущих мест на мировых энергетических рынках благодаря мощному ТЭК и значительным запасам энергетических ресурсов. В новом веке вопросам энергетической безопасности России уделяется все более серьезное внимание на всех уровнях исполнительной и законодательной власти. Особое ключевое место в этом занимает проблема повышения эффективности и безопасности хранения нефти и нефтепродуктов.

Практически вся нефть, добываемая в Западной Сибири, транспортируется подразделениями акционерного общества АООТ «Сибнефтепровод». Технологический процесс перекачки нефти в таких количествах предполагает наличие большого объема резервуарных емкостей. К примеру, общая резервуарная емкость АООТ «Сибнефтепровод» составляет 2530 тыс.м<sup>3</sup>, что составляет 147 резервуаров. На предприятиях «Сибнефтепровода» эксплуатируются резервуары различных типоразмеров: 74,5% РВС-20 000 (111 резервуаров), 17,7% РВС – 10 000 (26 резервуаров), 6,8% РВС -5 000 (10 резервуаров) [2]. Несмотря на снижение объемов перекачки в последнее время, вызванное сокращением добычи нефти, основная часть резервуарного парка продолжает активно эксплуатироваться. Большая часть эксплуатируемых в настоящее время резервуаров построена 20-30 лет назад. Основные конструкции резервуарных парков работают в сложном напряженно-деформируемом состоянии и зачастую сооружены на слабонесущих переувлажненных грунтах [2].

Самым распространенным типом резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов является резервуар вертикальный стальной цилиндрический (далее - РВС), который в процессе эксплуатации подвергается многофакторному комплексу внешних воздействий:

статических, малоцикловых, снеговых, ветровых и гидравлических нагрузок, перепаду внешних температур и агрессивных рабочих сред, неравномерным деформациям грунтового основания с локальными перенапряжениями корпуса резервуара.

Деформация грунтового основания в зимнее время является не только результатом динамических нагрузок сливо-наливных операций (наполнение, опорожнение резервуара), но и теплового взаимодействия горячего резервуара с его грунтом-основанием (фундамент резервуара и грунт, на котором этот фундамент располагается). Отсутствие системного подхода к учету многофакторности при проектировании, возведении и эксплуатации резервуаров часто приводит к возникновению аварийных ситуаций, снижению общей эксплуатационной надежности и резкому сокращению долговечности резервуаров.

Общие научные принципы проектирования, возведения и эксплуатации стальных вертикальных резервуаров сформулированы в работах отечественных ученых Ф.Ф. Абузовой, С.М. Астряб, В.Л. Березина, С.А. Бобровского, И.И. Буслаевой, В.Б. Галеева, С.Г. Едигарова, С.М. Иванцова, М.Г. Каравайченко, П.А. Коновалова, В.С. Корниенко, В.П. Матяша, И.Г. Овчинникова, Б.В. Поповского, Г.В. Раевского, М.К. Сафаряна, С.Н. Сотникова, В.Г. Шухова, и др.[3-7].

Наиболее полным исследованием по разрушению стальных резервуаров в настоящее время является монография И.М. Розенштейна [8], основанная на многолетнем опыте выполнения экспертиз ЦНИИПСК.

Из зарубежных ученых проблемами повышения эксплуатационной надежности резервуаров занимались: D. Brooksbank, H. Conrad, I.G. Currie, T. Gladmen, R.J. Holroid, J.E. King, S. Palmer, A.K. Runchal, R.N. Wright [9-17].

Несмотря на то, что для решения проблемы повышения эксплуатационной надежности и долговечности РВС в мире привлекаются значительные научные силы, на практике до сегодняшнего дня имеют место

целый ряд вопросов, связанных с конструированием, расчетом, возведением и безопасной эксплуатацией резервуаров.

В настоящее время имеет место серьезная тенденция роста аварий резервуаров практически по всему миру. Анализ статистической информации свидетельствует об экспоненциальной зависимости количества аварийных ситуаций от времени эксплуатации резервуарных парков [18-21].

Для определения основных причин аварий необходимо проанализировать известные примеры и причины аварийных ситуаций резервуаров в России и в мире.

### **Системный анализ аварийных ситуаций при эксплуатации резервуаров**

В последние годы XX столетия в России и за рубежом зарегистрированы массовые случаи отказов резервуаров.

В работах В.В. Филиппова, В.А. Прохорова, С.В. Аргунова, Н.И. Буслаевой [22, 23] проведен анализ отказов и предварительных ситуаций нефтеналивных резервуаров на нефтебазах республики САХА (Якутия). В 1990 г. на предприятии «Якутскнефтепродукт» и Нижнее-Бестяхской нефтебазы было обследовано техническое состояние более 20 резервуаров [22], при этом выявлено, что в ходе сезонного протаивания и промерзания грунтов РВС была выявлена максимальная разность осадок окраек по периметру днища от 102 мм до 258 мм. Это явилось также причиной возникновения серьезных аварийных ситуаций.

В 1966 году в Англии причиной разрушения нескольких резервуаров явилось возникновение хрупких трещин в сварных швах окраек (соединение листа стали со следующим листом) и в уторной зоне (зона соединения стенки резервуара с его днищем) [18].

В Японии в 70-х годах произошла авария в резервуарном парке: разрушились резервуары вместимостью 65 и 80 тыс. м<sup>3</sup>, аварии были

вызваны трещинами, возникшими в уторных швах. В 1974 году произошла авария резервуара вместимостью 38 тыс. м<sup>3</sup> из-за трещины в опорном узле, и сырая нефть вылилась в залив Сето. Причиной этой аварии была трещина, возникшая между стенкой и дном резервуара длиной 10 м и шириной 15 см [18].

На нефтеочистительном заводе в Мизушима (Япония), произошла авария резервуара вместимостью 40 тыс.м<sup>3</sup> 18 декабря 1974 года. Вытекшая нефть растеклась на большие площади и на долгое время загрязнила озеро Сето, что вызвало «исключительно тяжелый ущерб». Причиной аварии явились трещины, возникшие в окрайках, в зоне наибольших изгибающих моментов в районе уторного шва и развитие их в двух направлениях – параллельно стенке и в радиальном направлении резервуара [18]. Экспертами было отмечено, что такие напряжения в окрайках могли быть достигнуты за счет ряда воздействий: гидростатического давления, температурных градиентов (в резервуаре хранился мазут, перепад температур составил 37...108 °С), а также неравномерной осадки основания [24].

На нефтеперерабатывающем заводе в Великобритании на нефтеперерабатывающем заводе в Линдси в 1973 году произошла авария резервуара, содержавшего смесь сырой нефти, нефтесодержащих стоков и дренажных сбросов после очистки резервуаров и танкеров [25]. Непосредственной причиной разрушения резервуара было частое, хотя незначительное перенапряжение сварных швов в днище и прилегающей части обечайки вследствие систематического перегрева нижней зоны резервуара [24].

Еще один пример - резервуар объемом 10000 м<sup>3</sup> был построен по типовому проекту для районов с сейсмичностью 8 и 9 баллов. Во время гидравлического испытания на максимальный уровень до 11 метров между железобетонной кольцевой плитой и окрайкой дна резервуара по длине периметра 18 м образовался зазор до 100 мм с провисанием дна

шириной 0,5 – 1 м. Испытания были прекращены, и резервуар был освобожден от воды. Причиной этому была просадка фундамента резервуара при испытаниях [24].

В Донецкой области в г. Иловайск в 1985 году при температуре  $T=-4^{\circ}\text{C}$  резервуар емкостью 10 тыс. м<sup>3</sup> для нефти разрушен во время гидравлических испытаний через 14 часов после полной загрузки. Стенка резервуара была оторвана от днища и крыши и отброшена. В начале аварии появилась течь в сварном шве нижней части четвертого пояса.

Полное разрушение резервуара емкостью 30 тыс. м<sup>3</sup> с понтоном произошло в г. Ангарске Иркутской области в 1991 году при гидравлических испытаниях через 106 часов после заполнения. В результате аварии стенка резервуара была отброшена на 25 м, а потоком воды поврежден соседний резервуар на удалении 80 м и железобетонно ограждение. Причиной аварии явилось возникновение хрупкой трещины во втором поясе, которая распространилась вверх и вниз на все пояса.

Во время заполнения или опорожнения резервуара, осадка его основания в зависимости от характеристик грунта в средней полосе нашей страны достигает 25...35 мм. Зимой величина осадки уменьшается, а весной, когда солнечные лучи прогревают основание с одной стороны в большей степени, может произойти неравномерная осадка резервуара. Многолетняя эксплуатация резервуара при периодических осадках основания приводит к значительным перенапряжениям и неравномерным деформациям конструкции [24].

Систематизация и анализ информации, имеющейся в научно-технической литературе, вышеуказанный перечень аварий и их причин, опыт выполнения ремонтных работ, представленный в работах [3, 8, 18, 20, 21, 26], позволил установить, что более чем в 70% случаев аварии резервуаров произошли в результате разрушения самой перенапряженной зоны резервуаров, находящейся в месте сопряжения вертикальной стенки с окрайками (уторное соединение стенки и днища) [24].



Основными причинами этого являются: неравномерная осадка грунтового основания, которая возникает в результате теплового влияния горячего теплоносителя на грунт, неравномерная коррозия сварных швов, перекося и заклинивание плавающей крыши. Отказы и аварийные ситуации резервуаров продолжают нарастать и в настоящее время, что вызывает обеспокоенность как со стороны Ростехнадзора, так и многих заинтересованных организаций.

До настоящего времени не существует математической теории, достоверно отражающей изменение теплового состояния в стенке резервуара при развитии неравномерной осадки. Объясняется это сложностью проблемы взаимодействия резервуаров, обладающих значительной цилиндрической жесткостью, с грунтовыми основаниями, сложенными различными по минералогическому и литологическому составу, прочности и деформируемости грунтами [3].

Эксплуатационная надежность резервуарного парка зависит от корректности и полноты гидравлических испытаний резервуаров, целью которых является проверка прочности и устойчивости элементов конструкции РВС. Резервуар признается годным к эксплуатации, если в процессе заполнения водой и по истечению срока, регламентированного нормами, в конструкциях не обнаружены течи, остается постоянным уровень воды, а отклонения геометрических размеров не превышают установленные нормами пределы.

Такой подход может быть оправдан в случаях, когда резервуары построены и эксплуатируются на основаниях, сложенных грунтами высокой и средней несущей способности.

В случае залегания в основаниях резервуаров слабых водонасыщенных грунтов сроки развития и величины осадки определяются консолидационными характеристиками грунтов и, как правило, за время проведения гидравлических испытаний резервуаров стабилизация осадки не происходит. При дальнейшей эксплуатации резервуаров уплотнение

грунтов основания продолжается, что приводит к дополнительным деформациям самого резервуара.

Между тем, практически все резервуарные парки Западной Сибири возведены на слабых водонасыщенных грунтах, обладающих низкой несущей способностью и высокой деформируемостью. Из-за низких фильтрующих свойств таких грунтов консолидация оснований резервуаров происходит продолжительное время, а уплотнение грунтов другими известными методами либо технически неосуществимо, либо требует значительных материальных затрат. В зимнее время деформация грунтового основания может также происходить за счет миграции влаги в оттаивавшем грунте, под воздействием тепла, получаемого грунтом-основанием от горячего продукта в резервуаре.

Все вышесказанное, безусловно, свидетельствует об актуальности рассматриваемой проблемы повышения эксплуатационной надежности резервуаров.

В работе И.И. Буслаевой [3] основным фактором, влияющим на возможность разрушения резервуара, указаны температурные воздействия на стенки резервуара.

Выявлено [24] в ходе оценки практических результатов эксплуатации крупноразмерных РВС, что максимальные горизонтальные перемещения грунта в грунтовом основании наблюдаются на глубине, достигающей 15% от рабочего диаметра резервуара. Поэтому целесообразно рассматривать зоной исследования теплового взаимодействия резервуара и мерзлого грунта – толщину фундамента + толщину основания, равную 15% от диаметра резервуара.

Для эффективного повышения уровня безаварийной эксплуатации резервуаров на территории Тюменской области необходимо детально исследовать процесс теплового влияния нефтепродукта на грунт-основание резервуара и наоборот.

## 1.2 Теплофизические процессы, происходящие в резервуарах в зимнее время

Основными особенностями проектирования, строительства и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Западной Сибири на мерзлых и вечномёрзлых грунтах являются необходимость учета и регулирования теплообмена с сооружениями и с окружающей внешней средой [27].

Резервуары нефтебаз Тюменской области эксплуатируются в широком диапазоне температур от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (в районах Крайнего Севера до  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) до  $38\text{ }^{\circ}\text{C}$  без изоляции и подвергаются переменным температурным воздействиям под влиянием колебаний температуры окружающей среды и солнечной радиации [3]. Значительные перепады суточных температур влияют на тепловое состояние хранимых нефтепродуктов. Происходит изменение интенсивности тепловых процессов продукта внутри резервуара, изменяется плотность, вязкость и т.д.

Тепловое состояние нефтепродукта, определяется процессами теплопереноса в самом нефтепродукте, газовоздушном пространстве резервуара и окружающей среде [4]. Тепловое взаимодействие с окружающей средой происходит через ограждающую конструкцию: стенка, кровля и днище резервуара.

В резервуаре процесс теплопередачи в объеме нефтепродукта осуществляется за счет процессов: теплопроводности и свободной (естественной) конвекции. Естественная конвекция – это процесс теплообмена, который обуславливается разностью плотностей частиц жидкости (газа), имеющих разную температуру [28].

Теплопередача в зимнее время представляет собой сложный процесс теплообмена, состоящий из следующих этапов: теплоотдача от горячего теплоносителя к холодной стенке резервуара, передача тепла через стенку

за счет теплопроводности материала резервуара (стали), теплоотдача от ограждающей конструкции к холодной окружающей среде.

В условиях низких температур (ниже температуры застывания нефтепродукта) вблизи стенок, основания и на свободной поверхности возникает слой нефтепродукта с более низкой температурой - возможно замерзание нефтепродукта. В этом слое теплообмен рассматривается как сопряженный, состоящий из теплообмена при свободной конвекции между нефтепродуктом и слоем структурированной фазы и теплопроводности в застывшем слое (так как слой замершего продукта является хорошим теплоизолятором). Температура замершего слоя будет определяться температурой окружающей среды и при изменении ее изменяться вслед за ней.

Передача тепла в газоздушном пространстве происходит за счет свободной конвекции, так как горячая жидкость, испаряясь с поверхности продукта, нагревает холодное газовое пространство резервуара.

Расчеты, проведенные в работе [6], показали, что инерционность температурного режима жидкости намного выше, чем у газового пространства. Если на температуру газоздушной смеси заметное влияние оказывает суточный ход температуры атмосферного воздуха и солнечная радиация, то средняя температура жидкости суточным колебаниям подвержена слабо, что согласуется с экспериментальными данными. Измерения температурного поля жидкости в резервуаре выявили, что ее температура мало меняется в пределах массива и только на границах происходит изменение температуры [7].

Грунт в основании резервуара представляет собой многофазную дисперсную систему, в которой вещества могут находиться в трех состояниях: газообразное (пар), жидкое (растаявшая вода), твердое (лед). Процесс теплообмена в такой системе формируется под действием кондуктивной, радиационной и массообменной проводимости [3]. Также необходимо учитывать фазовые превращения в грунте: наличие мерзлой

и талой зон. Характерной особенностью теплового взаимодействия резервуара с мерзлым грунтом является то, что заполненный маловязким нефтепродуктом резервуар благодаря свободной конвекции является хорошим проводником тепла.

В зимнее время во время заполнения резервуара, температура ограждающей конструкции равна температуре окружающей среды, температура же жидкости намного превышает температуру среды, поэтому происходит односторонний нагрев температурой теплоносителя металлической стенки резервуара.

Температура элементов незаполненного резервуара будет следовать за изменением температуры окружающей среды, в связи с тем, что толщина стенок резервуара мала (стенки – 13 мм, кровли – 4 мм, днища – 6 мм), а также высок коэффициент теплопроводности стали.

В теплое время года на температуру стенок резервуара большое влияние оказывает солнечная радиация. Температуру на солнечной стороне стенки резервуара можно определить как среднюю температуру между внутренней и наружной средами и нагревом солнечной радиацией. На температуру на теневой стороне будет влиять температура внутренней и наружной сред. Температуру днища в первом приближении можно считать равной температуре внутренней среды, она также зависит от теплообмена между грунтом и внутренней среды резервуара. Температура днища и стенки в теневой стороне примерно одинакова. Тогда тепловое взаимодействие резервуара можно описать как односторонний нагрев солнечной радиацией [3].

В резервуарах большой емкости изменение температуры происходит преимущественно в пограничном слое, равном 0,1-0,2 характерного размера резервуара, а остальная масса жидкости остается изотермичной.

### **1.2.1 Обзор методик расчета теплового режима резервуара в зимнее время**

При эксплуатационных операциях резервуаров в зимнее время в условиях низких температур существует опасность нарушения рабочего режима резервуара: застывание воды, нефти и нефтепродуктов в резервуаре, как в момент заполнения, так и в момент последующего выстаивания.

При операциях заполнения и опорожнения резервуара важно оценивать количества тепла, которое потребуется для поддержания теплового баланса резервуара. Знание теплового баланса позволит учитывать влияние температуры на грунт-основание резервуара. Напомним, что данное воздействие является одним из основных для оценки неравномерной осадки резервуара во время эксплуатации емкости, так как будет наблюдаться оттаивание грунта, что приведет к миграции влаги. В зимнее время при поднятии влаги на поверхность происходит пучение породы, что может привести к повреждению днища резервуара и последующей его аварии. В случае необходимости тепловой баланс емкости потребуется для определения мощности подогревателя.

Для тепловых расчетов рабочих операций необходимо знать конечную температуру горячего продукта, которая зависит от производительности насоса, времени выстаивания и закачки, температуры окружающей среды, скорости и направления ветра, теплофизических свойств рабочей среды и т.д. Поскольку количество факторов, от которых зависит температура теплоносителя большое, то температуру определяют с некоторой степенью вероятности (вероятная температура).

В большинстве расчетов коэффициент теплообмена не рассчитывается, а принимается в зависимости от скорости ветра.

Данные упрощения могут привести к значительным погрешностям при расчете.

П.И. Тугунов в своей книге [29-31] описывает методику нахождения коэффициента теплопередачи от теплоносителя в окружающую среду. Коэффициент теплообмена определяется как среднее арифметическое по общей площади резервуара от коэффициентов теплопередачи через стенку в области газового пространства и жидкости, днище и кровлю.

Так как при определении вероятной температуры теплоносителя искомой величиной является конечной температура, то средняя температура стенки емкости определяется методом последовательных приближений.

Для резервуаров типа РВС при расчете внешней теплоотдачи Р.Ш. Латыповым рекомендовано пользоваться интегральным коэффициентом теплоотдачи, одновременно учитывающим теплоперенос как конвекцией, так и излучением. В результате обработки данных промышленных экспериментов автором [30]. Р.Ш. Латыповым были получены формулы для вычисления коэффициента теплоотдачи от горячего продукта к стенке емкости в дневное и ночное время суток. В результате расчета используется усредненная (за сутки) величина интегрального коэффициента теплоотдачи.

На практике во время проведения гидравлических испытаний и эксплуатации резервуара измеряют температуру воды термомпарами у поверхности, в середине и у днища резервуара, и результаты измерений отмечают в журнале.

Все вышесказанное подтверждает тот факт, что не существует полной методики по определению температуры основания в зависимости от изменения температуры закачиваемой жидкости в резервуар. Поэтому вопрос о создании методики определения температуры теплоносителя во время работы резервуара является актуальным. Данная методика позволит контролировать необходимый тепловой режим резервуара

во время его эксплуатации и определять время безопасного эксплуатационного режима.



### 1.3 Фундаменты и основания резервуаров

Проблема качества основания резервуаров имеет большое практическое значение, так как эксплуатационная надежность конструктивных элементов резервуаров зависит как от качества выполнения строительных работ, так и от правильности выбранных проектных решений.

Фундаментом называется часть сооружения, передающая нагрузку от массы сооружения на основание [32].

Основанием называется толща грунта, находящаяся ниже подошвы фундамента и воспринимающая давление, передаваемое фундаментом.

Грунты, находящиеся в условиях их природного залегания, являются естественными основаниями сооружений, а грунты, предварительно уплотненные или укрепленные другими способами, — искусственными основаниями.

Общие научные принципы проектирования, возведения и эксплуатации основания резервуаров сформулированы в работах отечественных ученых А.А. Бартоломея, В.Ф. Баршова, Н.В. Брантмана, С.И. Веревкина, В.Б. Галеева, А.А. Землянского, В.Д. Казарновского, В.И. Клевико, В.А. Котляровского, М.К. Сафаряна, Е.Л. Ржавского, А.А. Шаталова, Х.М. Ханухова и других ученых [5, 18, 24, 33, 34].

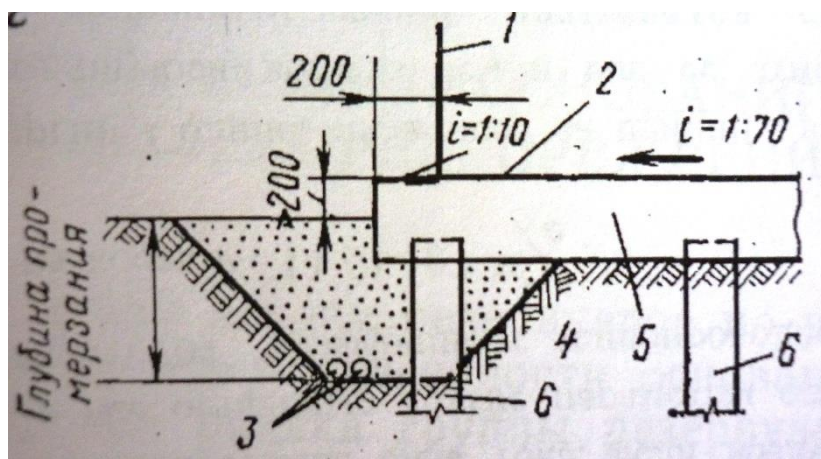
Отечественный и зарубежный опыт проектирования, строительства и эксплуатации оснований резервуаров показал, что возведение оснований резервуаров на строительных площадках сопряжено со значительными техническими трудностями, к которым относятся: обилие поверхностных вод, заболоченность территории и высокий уровень грунтовых вод, наличие слабых прослоек погребенных органических грунтов (торфов), плохие строительные и физико-механические свойства местных грунтов в связи с их переувлажненностью, глубокое сезонное промерзание

и протаивание, плавунные свойства многих разновидностей минеральных грунтов, пучинистость грунтов при промораживании в условиях свободного подтягивания влаги, сопровождающаяся снижением несущей способности их при сезонном оттаивании, большая деформационная способность грунтов (модуль деформации оснований резервуаров колеблется в пределах 2—10 МПа).

Анализируя условия строительства, в Западной Сибири можно отметить следующие инженерно-геологические особенности: заболоченность, деградацию вечной мерзлоты, высокий горизонт грунтовых вод, сильную сжимаемость и пучинистость грунтов.

Автор [35] все грунты Западной Сибири подразделяет на 2 группы: слабые и надежные. Это разделение грунтов относительно. Оно производится с учетом особенностей сооружения – величины нагрузки и предельно допустимых деформаций. И предлагает воспользоваться наиболее распространенным в данном случае решением – применение свайных фундаментов. В зависимости от расположения слабых или надежных слоев грунта предлагается разные способы возведения свай.

Анализируя рекомендации указанных авторов наиболее целесообразно пользоваться предпостроечным протаиванием грунтов под основаниями. После протаивания грунтов основания фундаменты проектируют обычным способом, как для талых грунтов.



**Рисунок 1.1 - Схема фундамента с железобетонным ростверком на сваях.**

**Примечание: 1- стенка резервуара; 2 – горячий битум; 3 - дренажные трубы; 4 – котлован, засыпанный камнем, который не вспучивается при замерзании; 5 – железобетонная плита; 6 – свая.**

Тюменская область – это район с суровыми природно-климатическими условиями. Поэтому в настоящее время нет единого проектного решения по основаниям стальных вертикальных резервуаров, которое можно рекомендовать специально для строительства сооружений нефтяной и газовой промышленности и ТЭК на данной территории.

Необходимо отметить, что грунты Западной Сибири в настоящее время недостаточно изучены и требуют дополнительных экспериментальных исследований. Такие мероприятия обеспечат предупреждение аварий и надежную эксплуатацию резервуаров в районах Западной Сибири.

### **1.3.1 Мерзлые грунты. Теплофизические процессы, происходящие в мерзлых грунтах-основаниях под «горячими» резервуарами в зимнее время**

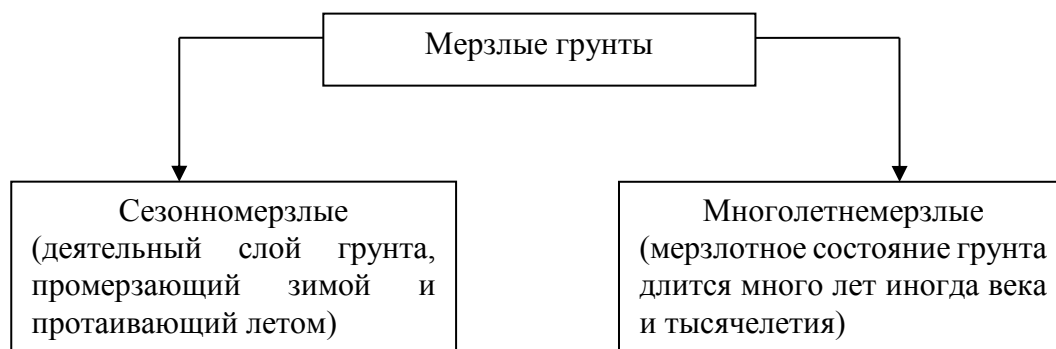
При эксплуатации, строительстве в условиях мерзлых грунтов нахождение тепловых полей необходимо для прогноза оттаивания и вызванного этим проседанием грунта. Кроме того, определение тепловых полей необходимо для оценки тепловых потерь и температурного режима жидкостей, попадающих в емкости.

При технологических расчетах необходимы сведения о параметрах грунта и воздуха. Основными исходными данными для расчета взаимодействия резервуара с грунтами являются заданный температурный режим теплоносителя, климатические характеристики района, состав и свойства грунтов, их среднегодовая температура в естественных условиях и под воздействием резервуара.

В связи с тем, что точно учесть все многообразие типов и свойств грунтов достаточно сложно, прогноз взаимодействия производят для некоторых средних значений выбранных характеристик и для наиболее неблагоприятных их сочетаний. Поэтому чаще всего целесообразно применять не точные решения о взаимодействии изучаемого объекта с грунтовым массивом, а оценку их взаимного влияния и на этой основе применять необходимые технологические решения.

Поэтому необходимо достаточно точно представлять механизмы физических процессов, происходящих в грунтах при изменении их температурного и влажностного режимов, и особенно процессов, происходящих в мерзлых грунтах при их протаивании. Теория теплового взаимодействия инженерных сооружений с мерзлыми грунтами является одним из разделов теплофизических основ геокриологии.

Мерзлыми грунтами называют грунты, имеющие отрицательную или нулевую температуру, в которых хотя бы часть воды перешла в кристаллическое состояние [36].



**Рисунок 1.2 - Два основных класса мерзлых грунтов**

В грунтах в естественном состоянии всегда содержится влага, которая при снижении температуры ниже нуля частично замерзает, цементируя минеральные частицы.

К одним из важных физико-механическим процессам, возникающим в оттаивающих грунтах, относится **миграция влаги**, в результате чего возникает морозное пучение грунтов и образование своеобразной текстуры мерзлых грунтов, во многом определяющей их механические свойства. Выяснение причин и зависимостей миграционного потока влаги от скорости промерзания основывается в основном на анализе экспериментальных данных по миграции влаги в промерзающих грунтах [37,38].

Одними из первых моделей миграции воды при промерзании и протаивании грунтов являются капиллярная теория Штукенберга [39] и близкая ей теория «порового вакуума». Обе теории предполагали, что миграция влаги к фронту промерзания и в мерзлый грунт происходит под действием капиллярных сил или пониженного атмосферного давления по

капиллярам и трещинам и «порам замерзания», возникающего за счет увеличения объема воды при кристаллизации.

Вопросами миграции влаги занимались следующие отечественные и зарубежные ученые: Р.И. Аболин, Х.Р. Акимов, А.П. Боженова, Ф.Г. Бакулин, Г.Б. Бесков, М.Н. Гольдштейн, Д.А. Драницын, Б.Н. Далматов, Б.В. Дерягин, К.О. Никифоров, Г.И. Покровский, Л.И. Прасолов, Н.А. Пузаков, В.Н. Сукачев, М.И. Сумгинов, Г.М. Фельдман, С.Я. Яковлев [22, 31, 40-54].

Согласно Институту мерзлотоведения имени В.А. Обручева Сибирского отделения Академии наук (ИНМЕРО), одной из причин миграции влаги в водонасыщенных дисперсных грунтах следует считать пленочно-кристаллизационный механизм. При этом пленочная вода продвигается под действием молекулярных сил от более толстых пленок к более тонким за счет того, что силы молекулярного притяжения более высоки у тонких пленок. В промерзающих грунтах при образовании кристаллов льда толщина пленок поровой влаги снижается, что вызывает подсос влаги из прилегающей талой зоны [37].

Трудами советской теплофизической школы, возглавлявшейся А.В. Лыковым, создана общая теория тепло- и массопереноса в многокомпонентных и многофазных дисперсных системах, в основе которой положена гипотеза о том, что внутреннее давление есть функция влажности и температуры. Это послужило основой для разработки целого класса математических моделей, объединенных общим механизмом и движущими силами миграции в форме пропорциональности градиентам влажности и температуры. Достаточно подробный анализ этой совокупности работ проведен в монографии С.Е. Гречищева и др. [55, 56].

К числу весьма важных наблюдений следует отнести обнаружение отставания фронта льдовыделения от фронта промерзания (Г.П. Бредюк, М.Н. Гольдштейн, В.Ю. Орлов, А.М. Пчелинцев [22, 43, 57]), что вскрыло

важную особенность мерзлого грунта – его проницаемость для влаги в области температур интенсивных фазовых переходов.

В отличие от упомянутых выше работ, где предполагается локально-равновесное состояние жидкой влаги в мерзлом грунте, в серии публикаций Ю.С. Даниэляна [27, 37, 38, 46, 58-60] обращается внимание на возможность влияния кинетики перехода влаги в равновесное состояние на рассматриваемые процессы. На основе данного подхода Б.Г. Аксеновым [61] рассмотрены некоторые задачи льдонакопления, а также изменения скачка льдистости под действием внешнего градиента температуры.

Свойства и текстура мерзлых грунтов весьма отличается от талых грунтов. Влияние температуры на теплофизические свойства промерзающих – протаивающих грунтов приобретает первостепенное значение. При этом можно выделить три интервала температур: полного протаивания, переходный, полного промерзания. При полных протаивании и промерзании влияние температуры несущественно и в практических расчетах не принимается во внимание. В переходной зоне теплофизические коэффициенты могут изменяться в десятки раз. Методы и результаты определения теплофизических коэффициентов промерзающих грунтов рассматриваются в работах следующих авторов: Р.И. Гаврильев, Я.Б. Горелик, Н.А. Цытович, А.Ф. Чудновский, и т.д. [62-67].

В исследуемой литературе очень подробно рассмотрен вопрос взаимодействия горячего трубопровода с мерзлыми грунтами, но практически не рассматривается взаимодействие объектов резервуарного парка с мерзлым грунтом. Однако нефть или нефтепродукт в резервуаре как в зимнее, так в летнее время эксплуатируется при постоянных положительных температурах, что в свою очередь может дать отрицательное влияние на фундамент и грунт-основание резервуара.

Все вышеуказанные особенности теплофизических процессов на мерзлых грунтах говорят о том, что для эксплуатации объектов нефтяной и газовой промышленности необходимо детальное экспериментальное и аналитическое исследование теплового взаимодействия сооружения на мерзлый грунт.

Очевидно, что правильный подбор рабочего режима при эксплуатации сооружения (резервуара) может обеспечить необходимую устойчивость и длительное существование без каких-либо опасных деформаций.



### **1.3.2 Процесс передачи тепла в грунт-основание от резервуара, заполненного горячей жидкостью**

Тепломассообмен в мерзлых породах изучали многие отечественные ученые, такие как Б.Г. Аксенов, Л.М. Альтшуллер, П.И. Андрианов, М.Н. Гольдштейн, Б.Я. Горелик, П.А. Гришин, С.Е. Гречищев, Б.И. Далматов, Ю.С. Даниэлян, И.С. Иванов, А.В. Павлов, Г.В. Порхаев, И.Н. Рабинович, В.И. Станов, Н.А. Цытович [2, 8, 29, 37, 43, 45, 58-60, 64, 65, 68-79] и многие другие.

Основания под резервуарами представляют собой сложные многокомпонентные и многофазные термодинамические дисперсные системы со статистическим распределением частиц.

Основания характеризуются эффективными теплофизическими параметрами вследствие того, что в них теплообмен осуществляется посредством совместно протекающих и накладывающихся друг на друга процессов молекулярной, конвективной, радиационной и массообменной проводимости, а также из-за наличия дополнительных источников тепла фазовых переходов поровой влаги. При изучении теплофизических свойств дисперсные среды рассматриваются как системы с осредненными параметрами [63].

При положительной температуре грунты обычно являются 3-компонентной системой, содержащей минеральные частицы, воду и воздух. Эти составляющие грунта — твердая, жидкая и газообразная — по-разному реагируют на изменение внешних условий: температуры, давления, влажности и т. д. Особо активную роль при этом играет вода, при отрицательных температурах частично или полностью переходящая в лед, который как бы цементирует минеральные частицы и придает грунту новые физические и механические свойства. Система при этом оказывается более сложной — 4-компонентной.

При оттаивании мерзлых грунтов под нагрузкой в момент перехода из области отрицательных в область положительных температур часто наблюдается просадочность, т. е. резкое нарастание деформаций, приводящих к провальным осадкам.

Вследствие миграции влаги к фронту промерзания в процессе пучения грунты, имевшие твердую или пластичную консистенцию до промерзания, после оттаивания часто находятся в текучепластичном и даже текучем состоянии и не могут практически нести нагрузки. Это в наибольшей степени проявляется при оттаивании грунтов со слоистой или сетчатой текстурой.

Поскольку фундаменты резервуаров заложены в слое сезонного промерзания и оттаивания грунта, то вследствие неодинаковых грунтовых и температурных условий вдоль такого сооружения можно ожидать развития неравномерных деформаций, как при пучении, так и при оттаивании грунта.

При тепловых расчетах важно не принять теплофизические характеристики грунта (коэффициент теплопроводности, теплоемкость и др.) постоянными величинами, а учитывать зависимость от температуры, влажности и др. физических величин.

Также важное тепловое влияние в зимнее время оказывает пустой резервуар на оттаявший фундамент - основание. На передачу теплоты от грунта к стенкам резервуара большее влияние оказывает коэффициент теплопроводности. В процессе теплообмена между грунтом и резервуаром стенки сосуда, ввиду их низкой температуры, охлаждают грунт, насыщенный влагой, и грунт около окрайки обмерзает.

На практике для ограничения теплового взаимодействия резервуара с грунтами, особенно с пучинистыми, грунты вокруг стенки резервуара и под его днищем подогревают. Для этого в грунт на расстоянии 0,5 - 1,5 метра от резервуара закладывают прутковые

электроподогреватели. При обратной засыпке резервуара песчаным грунтом устраивать подогрев вокруг стенок обычно не требуется [80].

Таким образом, формирование температурного режима в грунтах около сооружений, тем более в районах глубокого сезонного промерзания, зависит от многих факторов и пока еще (ввиду сложности учета всех факторов) не поддается строгому теоретическому решению. Поэтому результаты экспериментальных исследований температурного режима в грунтах около резервуара в настоящее время могут быть наиболее достоверными.

### **1.3.3 Обзор методик расчета температурного поля мерзлого грунта и глубины сезонного протаивания под резервуаром в зимнее время**

Следует, прежде всего, отметить, что большинство сооружений до настоящего времени возводилось с оттаиванием мерзлых грунтов оснований, что часто делалось несознательно, поэтому не учитывались ни величина, ни неравномерность осадок оттаивания мерзлых оснований.

Игнорирование оттаивания мерзлых оснований или допущение оттаивания без учета его последствий неизбежно приводит здания и сооружения, возводимые в условиях мерзлых грунтов, к недопустимым деформациям, нарушающим эксплуатацию сооружений или приводящим их к разрушению.

Классическим примером вышеуказанных явлений является задача о промерзании грунта, которую решил в середине 19-го века венский математик Стефан; с тех пор подобные задачи носят имя задач Стефана [28]. Способы и методы решения данных задач подробно рассмотрены в книгах [81-82].

Исследование осадок мерзлых грунтов в Советском Союзе при оттаивании начато было еще в 1933 году [1], когда был предложен способ испытания мерзлых грунтов в специальном приборе на осадку при оттаивании под нагрузкой [67].

Этот способ давал возможность определять лишь общую осадку уплотнения оттаивающих грунтов, не разделяя ее на составляющие.

Начиная с 1937 года, и особенно в 1939-1940 года, ввиду особой актуальности вопроса и требований практики, исследованию осадок мерзлых грунтов при оттаивании мерзлых грунтов уделялось большое внимание. Здесь следует отметить работы следующих отечественных ученых: Г.И. Лапкина (предложил разделять осадку мерзлых грунтов на условную осадку протаивания и переменную обсадку обжатия),

А.Е. Федосова (предложил способ прогноза просадки водонасыщенных глинистых грунтов), М.Н. Гольдштейна (исследовал компрессию мерзлого грунта при нагрузке и разгрузке), Н.А. Цытовича (исследовал компрессию мерзлых грунтов при оттаивании) [1, 43].

Необходимо отметить, что на основе исследований компрессии оттаивающих грунтов был подробно разработан метод расчета окончательных стабилизированных осадок фундаментов на оттаивающих грунтах и метод прогноза протекания осадок оттаивающих грунтов со временем.

Вышеуказанные работы по исследованию осадок мерзлых грунтов при оттаивании получили дальнейшее развитие в работах следующих ученых: В.П. Ушкалова, М.Ф. Киселева [1]. Центральный вклад в теорию и практику прогноза осадок фундаментов на оттаивающих грунтах внесли работы научных сотрудников НИИоснования Ю.К. Зарецкого, В.Г. Григорьева, М.В. Малышева, В.М. Пономарева и др. [1, 24]. Этой группой ученых в 1967-1970 годах были составлены «Указания по расчету осадок оттаивающих и оттаявших грунтов во времени».

Изучению влияния цикла промерзания и оттаивания на свойства грунтов был посвящен ряд работ Х.Ф. Винтеркорна, М.Н. Гольдштейна, В.Г. Григорьевой, Н.К. Захарова, В.Д. Пономарева, А.М. Пчелинцева, Е.П. Шушеринной [1, 43, 54, 78].

Полные исследования компрессии оттаивающих грунтов проводились следующими учеными В.Ф. Бакулиным, М.Н. Гольдштейном, В.Ф. Жуковым, М.Ф. Киселевым, Н.А. Цытовичем, В.П. Ушкаловым [1].

По теплофизике мерзлых и вечномерзлых грунтов, решения которой совершенно необходимы для прогноза глубин протаивания мерзлых грунтов, а по ним и осадок оттаивающих грунтов, весьма важная работа опубликована Г.В. Порхаевым «Тепловое взаимодействие зданий и сооружений с вечномерзлыми грунтами» [83].

Формулы, представленные в книге Г.В. Порхаева, позволяют просто рассчитать глубину и очертание максимальной (предельной) чаши протаивания грунта под сооружениями.

Очень удобные графики для нахождения чаши протаивания дает М.Д. Головкин [84].

Процесс протекания осадок мерзлого грунта при их оттаивании во времени отличается от процесса протекания осадок немерзлых грунтов, во-первых, тем, что осадка оттаивающих грунтов не заканчивается в момент их оттаивания (особенно мерзлых глинистых грунтов), а продолжается еще некоторое время и, во-вторых, характер изменения осадок во времени зависит не только от свойств оттаивающих грунтов, но и от скорости и режима оттаивания.

Еще в 1938-1940 года и позднее группой отечественных ученых под руководством Н.А. Цытовича были поставлены специальные опыты по изучению процесса протекания осадок мерзлых грунтов при оттаивании при различном режиме оттаивания [67].

В технической литературе достаточно хорошо освещены методики тепловых расчетов для линейных объектов (подземных трубопроводов, каналов и др.) [85] и практически отсутствуют методики для сосредоточенных объектов, а также методики для расчета тепловых полей под используемыми резервуарами в резервуарных парках.

Автор статьи [60] предлагает приближенный аналитический метод определения стационарного температурного поля вокруг тепловыделяющих объектов произвольной формы. Приближенное аналитическое решение этой задачи строится с использованием метода источников и стоков совместно с методом наименьших квадратов.

Все известные методы расчета глубины и чаши протаивания под сооружениями составлены на результатах лабораторных исследований и не имеют возможности проверить правильность их при решении дифференциальных уравнений теплопроводности.

Также при расчетах температурного поля оттаявший грунт рассматривается однородным и не учитывается многослойность фундамента.

В окончании хотелось бы сказать, что из анализа практической работы сооружений на оттаивающих грунтах основаниях вытекает несколько выводов:

1. оттаивание грунтов под фундаментами сооружений происходит неравномерно: под серединой сооружения будет наибольшая глубина оттаивания, у краев – наименьшая;

2. вследствие разной глубины оттаивания грунтов под различными частями сооружений и их неоднородности при возведении сооружений на оттаивающих грунтах всегда имеет место неравномерные осадки фундаментов во все время оттаивания мерзлой толщи грунтов основания.

## **Выводы по главе I.**

1. Установлено, что РВС в процессе эксплуатации подвержен многофакторному комплексу внешних воздействий. В зимнее время вопрос теплового взаимодействия горячего резервуара с его грунтово-основанием является актуальным, поскольку является одним из факторов неравномерной деформации грунтового основания.

2. Выявлено, что максимальные горизонтальные перемещения грунта в грунтовом основании наблюдаются на глубине достигающей 15% от рабочего диаметра резервуара.

3. Математическая модель теплового состояния резервуара представляет собой полную систему дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса для хранимой жидкости, газовой смеси над ней, уравнений теплопередачи через ограждающую конструкцию резервуара и уравнений теплообмена в окружающей среде. Решение этой задачи с учетом всех влияющих факторов представляет собой значительные трудности. Общее решение нестационарной задачи по определению теплового режима резервуара позволит решить большое количество прикладных задач.

4. Существующие методики расчета теплового режима резервуара имеют ряд ограничений, не позволяющих правильно оценивать изменение температуры теплоносителя в резервуаре во время эксплуатационных операций.

5. При разработке методики расчета теплового режима резервуара во время эксплуатации в зимнее время необходимо учитывать структуру и особенности фундамента основания резервуара, теплофизические свойства сред (коэффициент теплопроводности, температуропроводности, влажность грунта и воздуха, объемный вес грунта, скорость ветра, температурный режим), участвующих в теплообмене (воздух, грунт-основание, теплоноситель), гидравлические режимы закачки (скорость и время заполнения) среды в резервуар.



6. Оттаивание грунтов под фундаментами сооружений происходит неравномерно: под серединой сооружения будет наибольшая глубина оттаивания, у краев – наименьшая.

7. Вследствие разной глубины оттаивания грунтов под различными частями сооружений и их неоднородности при возведении сооружений на оттаивающих грунтах всегда имеет место неравномерные осадки фундаментов во все время оттаивания мерзлой толщи грунтов основания.

## **Глава II. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ В ГРУНТЕ**

### **2.1. Экспериментальное исследование нестационарных тепловых режимов в грунте**

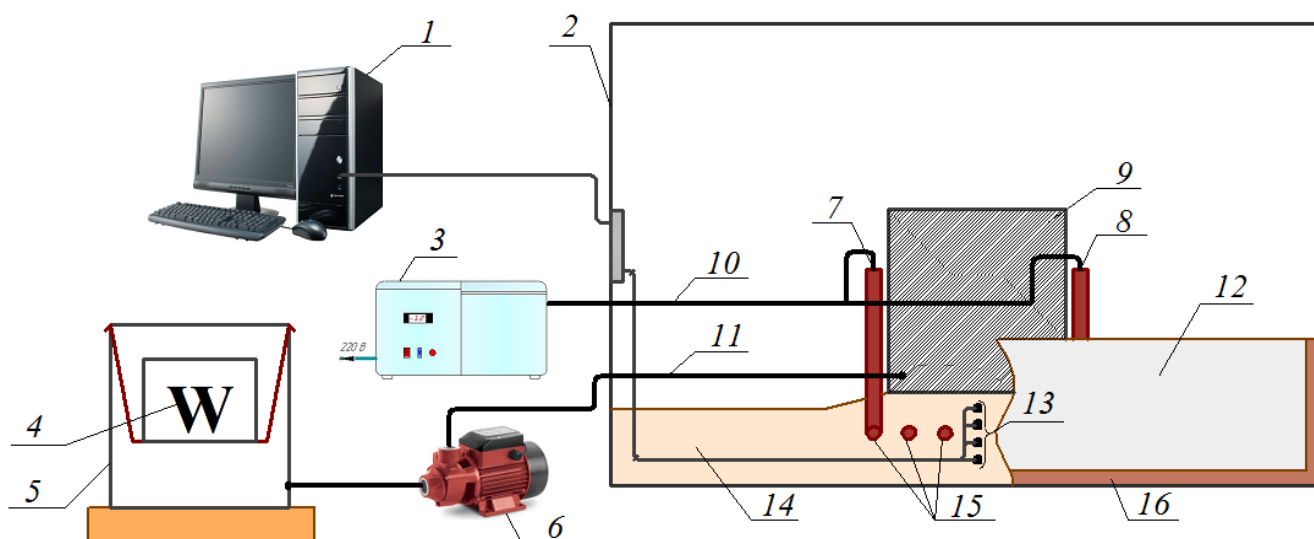
Оттаивание мерзлого грунта – это сложный термодинамический процесс, протекающий в неоднородной капиллярнопористой среде и осложненный наличием фазовых переходов грунтовой влаги. При прогреве грунта под воздействием тепловой энергии происходит плавление льда, перераспределение образовавшейся при этом влаги и перемещение границы оттаивания [86].

Большая часть работ, рассмотренных на данную тематику, а именно лабораторные исследования нестационарных тепловых полей под горячими резервуарами, не отражено в литературе. Есть ряд работ, которые отражают натурные исследования оттаивания мерзлого грунта [46].

В работе [86] рассмотрен способ получения, обработки и анализа информации о динамике изменения теплофизических свойств исследуемого объекта на примере изучения характера распределения температурных полей в мерзлом грунте при его искусственном оттаивании. Приведены результаты лабораторных исследований по оттаиванию мерзлого грунта в виде эмпирических температурных полей.

## 2.2. Описание экспериментальной установки и системы измерений

Для исследования процессов протаивания мерзлого грунта под резервуаром с горячей нефтью была создана экспериментальная установка в лаборатории по исследованию взаимодействия мерзлых грунтов с инженерными конструкциями на кафедре механики многофазных систем Тюменского государственного университета. Общая схема установки приведена на рисунке 2.1. [89-92].

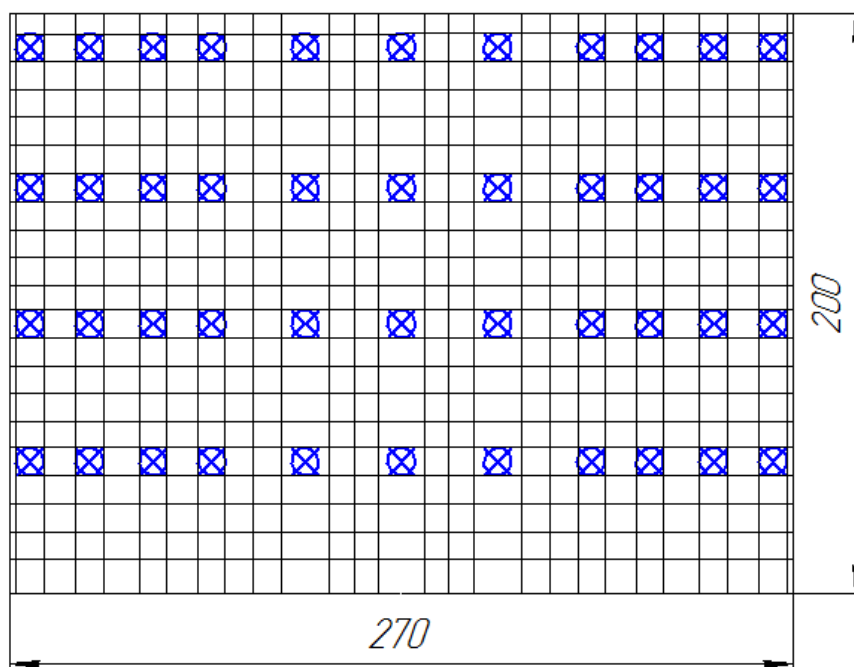


**Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки.**

**Примечание:** 1 – персональный компьютер; 2 – климатическая камера; 3 – криостат; 4 – нагревательный элемент; 5 – емкость для нагрева нефти; 6 – насос; 7 – вход в систему охлаждающих труб; 8 – выход из системы охлаждающих труб; 9 – модель резервуара вертикального стального; 10 – шланг для перекачки хладагента; 11 – шланг для перекачки теплоносителя; 12 – теплоизоляция рабочей области; 13 – датчики температуры; 14 – грунт; 15 – система охлаждающих труб; 16 – деревянный лоток.

Экспериментальная установка включает в себя следующие элементы: климатическую камеру (2), деревянный лоток (16) с теплоизоляцией (12), модель резервуара вертикального стального (9), насос (6), систему нагрева (4, 5), систему охлаждающих труб (7, 8, 15), криостат (3) и автоматизированную систему измерения температуры в грунте и резервуаре (1, 13).

Поскольку рассматриваемая задача радиально симметричная, датчики расположены по радиусу резервуара. В целях минимизации погрешности измерений вследствие смещения датчиков применена решетка для их фиксации (рисунок 2.2).



**Рисунок 2.2 – Схема расположения температурных датчиков**

Нагрев нефти осуществляется в системе коаксиальных сосудов: внутри емкости с нефтью расположена емкость с водой, в которой расположен нагревательный элемент.

Деревянный лоток, ограничивающий рабочую область грунта, имеет размеры 1190 × 1290 × 350 мм. Лоток изолирован листами пенополистирола толщиной 100 мм, что позволяет при численном моделировании считать равным нулю тепловой поток через стенки морозильной камеры.

**Насос.** Для перекачки теплоносителя применяется вихревой насос ROVER Pompe BE-M 20. Насосы типа BE предназначены для перекачки таких жидкостей как дизельное топливо, сырая нефть, соленая вода, охлажденные эмульсии и другие жидкости с вязкостью не более 50 сСт. Температура перекачиваемой жидкости должна быть не более 60 °С.

Используемый насос является реверсивными, то есть может перекачивать жидкость в обоих направлениях. Производительность насоса 1700 л/час, напор 24 м.

Рабочее колесо и корпус насоса выполнены из бронзы [87].

**Климатическая камера.** Климатическая камера представляет собой параллелепипед размерами 2250 × 1600 × 2000 мм, толщина стенок камеры 100 мм. Стенки изготовлены из пенополистирольных плит, которые герметично стыкуются друг с другом. Доступ во внутреннее пространство камеры осуществляется через дверь размерами 950 × 2000 мм. Дверь герметично закрывается.

Для охлаждения внутреннего объема камеры используется съемная моноблочная холодильная машина электрической мощностью 2,2 кВт, которая вмонтирована в лицевую панель. Электрический вентилятор внутри камеры создает циркуляцию воздуха, что обеспечивает равномерное распределение температуры воздуха внутри климатической камеры. В климатической камере можно задавать и поддерживать температуру в диапазоне от минус 24 до 20 °С с абсолютной погрешностью  $\pm 1$  °С [88].

### **Автоматизированная система мониторинга температуры.**

Автоматизированная система мониторинга температуры включает в себя цифровые датчики температуры DS18B20, персональный компьютер, COM адаптер однопроводной сети 1-Wire, стабилизированный источник питания.

Цифровой датчик температуры DS18B20 с программируемым от 9 до 12 bit разрешением, которое может сохраняться в EEPROM памяти, обменивается данными с компьютером по 1-Wire шине и при этом может быть как единственным устройством на линии, так и работать в группе. Каждый датчик DS18B20 имеет свой уникальный идентификационный код. Все процессы на шине управляются сервисной программой, установленной на компьютере.

Метрологические характеристики датчика: диапазон измеряемых температур от минус 55 °C до 125 °C; абсолютная погрешность не превышает 0,5 °C в диапазоне температур от минус 10 °C до 85 °C.

Принцип действия датчика DS18S20 основан на подсчете числа импульсов, вырабатываемых генератором с низким температурным коэффициентом во временном интервале, который формируется генератором с другим температурным коэффициентом, при этом внутренней логикой датчика учитывается и компенсируется параболическая зависимость частот обоих генераторов от температуры.

Каждый датчик DS18B20 имеет уникальный 64-битный последовательный код, который позволяет общаться с множеством датчиков DS18B20 установленных на одной шине. Такой принцип позволяет использовать один микропроцессор, чтобы контролировать множество датчиков DS18B20, распределенных по большому участку. Приложения, которые могут извлечь выгоду из этой особенности, включают системы контроля температуры в зданиях, и оборудовании или машинах, а также контроль и управление температурными процессами.

Перед проведением эксперимента все датчики прошли калибровку: датчики были погружены в лоток с теплой водой, с помощью автоматизированной системы измерения температуры на экран компьютера были выведены значения температуры воды. Показания температурных датчиков находились в пределах погрешности:  $-0,25\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta T \leq 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для работы с датчиками DS18B20 на персональном компьютере используется специальная лицензионная программа «TempKeeper». С помощью этой программы осуществляется мониторинг и сохранение показаний температуры по каждому из подключенных датчиков. В программе предусмотрена возможность выбора точности преобразования температуры из следующего ряда значений: 0,5; 0,25; 0,125 и 0,0625 °C.

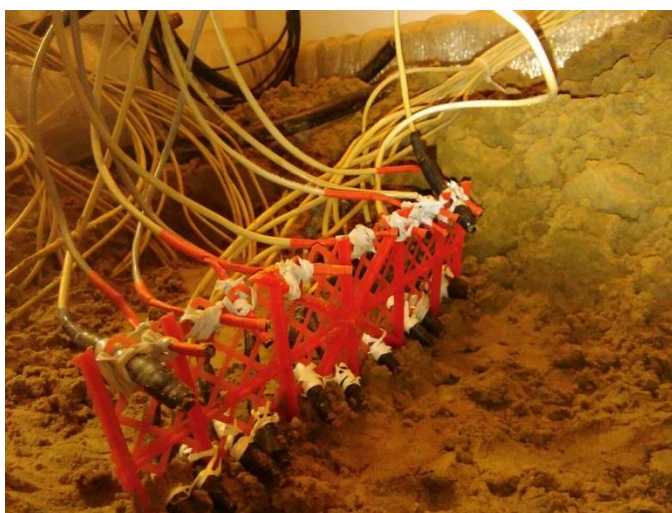
**Исследуемый резервуар.** При создании макета нефтехранилища, представленным одним резервуаром, было использовано геометрическое подобие создаваемой установки и реальных объектов. Модель представляет собой металлический цилиндрический резервуар диаметром 530 мм и высотой 400 мм, заполненный нефтью. Толщина металлической стенки резервуара равно около 2 мм, толщина днища 3 мм. В связи с тем, что фундамент резервуара по сравнению с его высотой имеет незначительное значение, в модели нефтехранилища, фундамент был представлен 1 слоем теплоизоляции (изолоном, толщина 3 мм).

## 2.3 Порядок и методика обработки результатов измерений

### *Подготовительные мероприятия и порядок проведения эксперимента [89]*

1. В предварительно подготовленный лоток производится засыпка песчаника.

2. В грунтовый материал устанавливаются датчики температуры DS18B20. Расположение датчиков в грунте представлено на рисунке 2.3. Датчики расположены параллельно основанию лотка. Каждому датчику присваивались свои координаты.



**Рисунок 2.3 - Расположение датчиков в грунте**

3. Также устанавливаются датчики температуры в область налива нефти в исследуемом резервуаре, область газового пространства резервуара, на внутреннюю сторону стенки исследуемого резервуара и в область налива нефти в резервуаре для нагрева.

4. Настраивается автоматизированный комплекс мониторинга температуры грунта. Для этого выполняются следующие работы: каждому датчику присваиваются индивидуальный номер для удобства



дальнейшей работы, проверяется работоспособность каждого датчика и всей измерительной системы в целом.

5. Производится увлажнение грунтового материала до необходимой влажности. Для этого проделываются следующие действия: в лоток с грунтом заливается вода, после 24 часов производится определение влажности методом высушивания до постоянной массы, при необходимости добавляется вода.

6. Производится определение влажности методом высушивания до постоянной массы.

7. На климатической камере устанавливается требуемая температура воздуха в рабочей зоне, идет процесс до полного замораживания грунта. Одновременно для оценивания температуры грунта запускалась на компьютере программа *Temp Keeper*. Происходит запись данных температурных датчиков. По мере охлаждения грунтового массива производится периодический мониторинг температуры.

Обычно весь процесс равномерного замораживания грунта составляет в среднем 4-5 суток. Грунт замораживается до необходимой температуры. Установленные датчики позволяют оценить равномерность замораживания грунта и грунт замораживается до тех пор, пока все датчики не покажут равные значения температуры с учетом погрешности.

8. После того как грунт будет готов, включается система подогрева нефти. Заполняется емкость для нагрева теплоносителя 50 л воды. Устанавливаются нагревательные элементы, подключаются к сети.

9. Периодически помешивая теплоноситель, контролируется его температура по показаниям датчика DS28\_057. При достижении необходимой температуры теплоносителя, открывается кран для заполнения исследуемого резервуара. Запускается насос для интенсивной перекачки нефтепродукта. Исследуется первый тепловой режим - закачка резервуара.

10. После закачки в резервуар 25 – 30 л теплоносителя, насос ставится в нейтральное положение. И исследуется второй тепловой режим – выстаивание резервуара.

11. В ходе эксперимента приходилось контролировать температуру горячего теплоносителя внутри исследуемого резервуара по показаниям датчиков DS28\_036, DS28\_055. При понижении температуры теплоносителя ниже 33 °С, из резервуара с помощью насоса откачивалась часть остывшей жидкости (в среднем около 10 литров), в системе подогрева жидкость перемешивалась и подавалась заново в исследуемый резервуар. Таким образом поддерживалась постоянная температура нефтепродукта в резервуаре.

12. Для исследования температурного поля в оттаившем грунте, установленные датчики записывали показания через каждые 3 минуты.

### **Обработка результатов [89]**

1. Полученные данные необходимо экспортировать в *Excel*, записать координаты датчиков.

2. Построить температурные поля грунта при протаивании в различные моменты времени. Для построения температурных полей воспользуйтесь программой *Sigma Plot*.

Для этого необходимо создать рабочий файл, внести координаты и показания температурных датчиков. Выбрать тип графика *Contour Plot*, подтип *Filled Contour*. Формат данных *XYZ Triplet*, обозначить колонки данных, соответствующих координатам (координате  $r$  эксперимента соответствует координата  $x$  в программе, координате  $z$  – координата  $y$ , значению температуры – координата  $z$ ).

Примечание: в настройках графика установить подписи изолиний. Выбрать вкладку *Plots*, затем *Labels*. В пункте *Contour labels* выбрать *Major contour labels*. Регулировать частоту подписей температуры можно на шкале *Label frequency*.

Программа *Sigma Plot* позволяет построить графики движения нулевой изотермы во время эксперимента, график изменения температуры грунта вдоль радиуса резервуара на различных глубинах в произвольный момент времени процесса протаивания грунта, построить график изменения температуры нефти в ходе эксперимента по показаниям датчика температуры и многое другое.

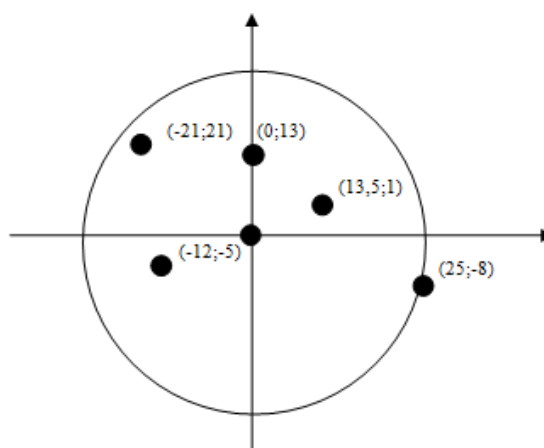
## 2.4 Нестационарные температурные поля в резервуаре и грунте

На лабораторной установке были проведены 6 экспериментов, результаты всех экспериментов показали схожие друг с другом экспериментальные данные.

### Эксперимент №1

В первой серии экспериментов использовалось 35 температурных датчиков, из них 1 установлен в емкости для нагрева нефти, 3 датчика установлены в исследуемом резервуаре с целью измерения температур нефти, газового пространства и стенки резервуара, 31 датчик установлен в исследуемом грунте. Координаты датчиков представлены в таблице 2.1.

Датчики температуры исследуемого грунта расположены радиально по 5-6 датчиков на одном слое согласно рисунку 2.4. Общее количество слоев равно 5.



**Рисунок 2.4 – Схема установки температурных датчиков в исследуемом грунте на глубине 3 см при проведении первой серии экспериментов**

Координаты датчиков в эксперименте № 1

Номер датчика	x	y	z
1	11	9	12
2	0	24	6
3	13,5	1	3
4	0	14	9
5	0	13	3
6	11	-10	15
7	10	7	6
8	0	0	9
9	22	15	15
10	6	13,5	15
11	23	-15	12
12	25	-8	3
13	27	5	9
14	0	27	12
15	0	0	15
16	-12	-5	3
17	-27	3	15
18	0	0	3
19	-21	-17	12
20	-12	8	12
21	-10	-7,5	9
22	0	0	12
23	-10	6	6
24	-2	-14	6
25	-21	21	3
26	-4	-25	9
27	0	-26	15
28	0	0	6
29	-17	-24	6
30	5	-13	12
31	24	-13	6
32	Температура нефти в исследуемом резервуаре		
33	Газовое пространство в исследуемом резервуаре		
34	Температуре стенки в исследуемом резервуаре		
35	Температура нефти в резервуаре для нагрева		

При проведении эксперимента начальная температура грунта одинакова в каждой его точке и равна температуре воздуха в морозильной камере минус 8 °С.

В эксперименте смоделирован процесс «выстаивания» теплоносителя при постоянной температуре окружающей среды равной минус 8 °С.

Распределение влажности грунта по глубине его залегания представлено в таблице 2.2.

Таблица 2.2

## Результаты измерения влажности грунта в эксперименте № 1

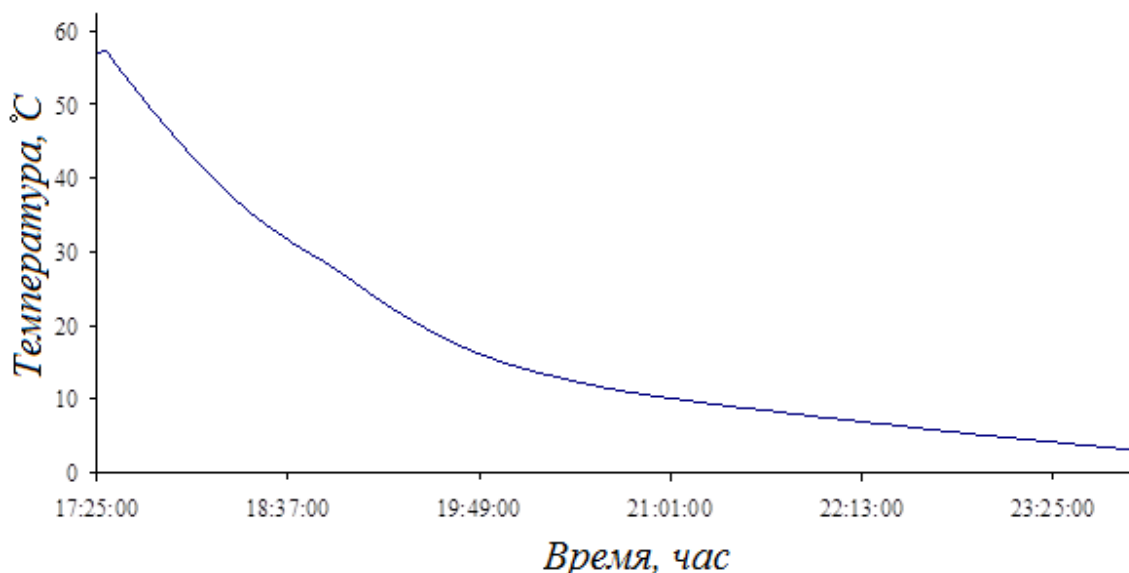
Глубина, мм	Влажность, %
0 – 34	17,83
35 – 69	18,83
70 – 104	18,95
105 – 139	19,37
140 – 170	21,00

Эксперимент № 1 был начат в 15:23. Время проведения эксперимента 18,5 часов. Температура нефти в резервуаре была равна 55°С.

Спустя 8 часов от начала проведения эксперимента температура нефти достигла 0°С, и начался процесс замораживания как теплоносителя, так и грунта.

Данный эксперимент позволил исследовать тепловой режим резервуара - выстаивание и построить зависимость изменения температуры нефтепродукта и газового пространства [93].

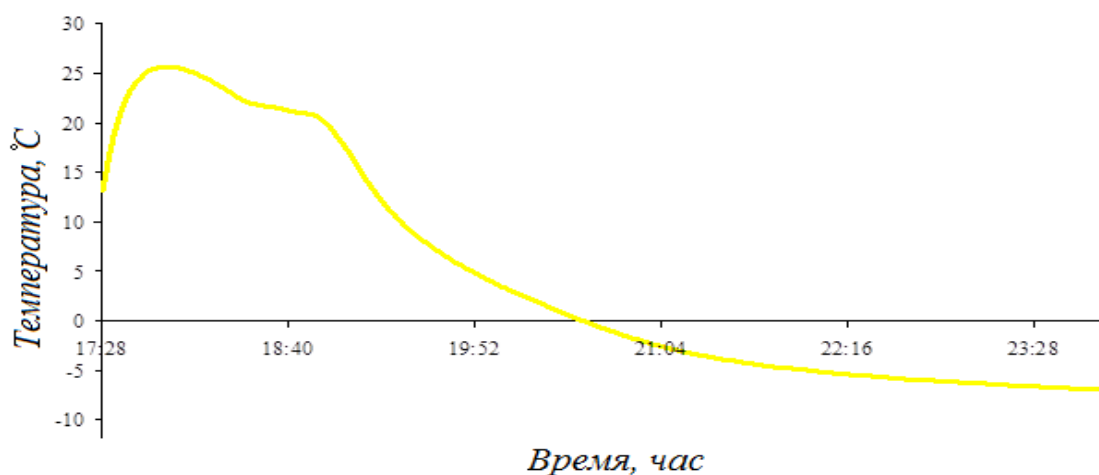
Изменение температуры нефти при выстаивании в резервуаре изображено на рисунке 2.5.



**Рисунок 2.5 – Изменение температуры нефти при выстаивании в резервуаре**

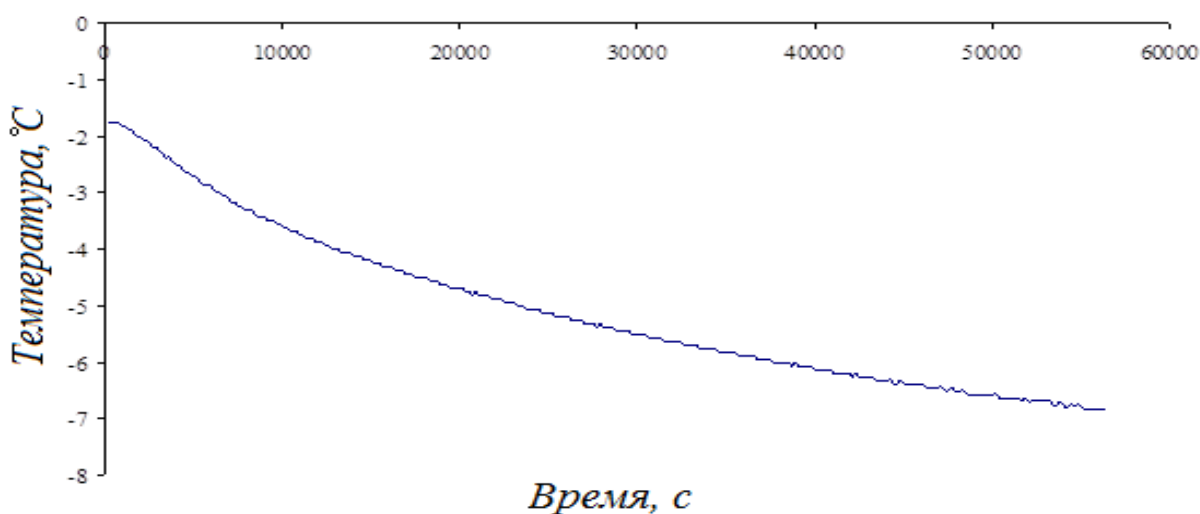
Проанализировав зависимость температуры нефти от времени можно увидеть, что зависимость носит экспоненциальный характер, что подтверждает характер выведенной ранее П.И. Тугуновым [29] зависимости  $T$  нефти от времени.

На рисунке 2.6 изображена зависимость температуры газового пространства от времени. После 30 минут закачки нефти произошло открытие клапана, расположенного на крыше резервуара (спроектирован принцип «большого» дыхания резервуара), и газоздушная смесь с температурой внутри свободного газового пространства начала смешиваться с воздухом, температура которого равна температуре окружающей среды [93].



**Рисунок 2.6 – Изменение температуры газового пространства при выстаивании нефти в резервуаре**

В 17:21:38 в исследуемый резервуар был закачан горячий теплоноситель. Спустя 3 часа температура грунта достигла значения минус 1,685 °C (датчик с координатой {0;0;3} – центр резервуара). Так как поверхность мерзлого грунта взаимодействовала с холодным воздухом, произошло замерзание грунта, протаивание грунта не было достигнуто. Изменение температуры грунта от времени приведено на рисунке 2.7.



**Рисунок 2.7 – Изменение температуры грунта под центром резервуара от времени**



Также в эксперименте №1 удалось исследовать температуру внутренней стенки резервуара. Согласно данным эксперимента, спустя 3 минуты три первых датчика, установленные на стенке резервуара, (DS28\_055, DS28\_049, DS28\_053) были скрыты горячим теплоносителем и показывали температуру стенки в области жидкости, датчик DS28\_054 показывал температуру стенки в области газового пространства [94].

При анализе данных по вышеуказанным датчикам можно сделать вывод о том, что температура стенки в области жидкости равна температуре горячего теплоносителя (с учетом погрешности температурного датчика 0,5 °С). Данные в таблицах 2.3, 2.4 выборочные [94].

Таблица 2.3

**Экспериментальные значения температуры внутренней стенки резервуара в области жидкости при режиме закачки**

Время проведения эксперимента, мин	Экспериментальные значения температуры внутренней стенки резервуара в области жидкости				Расчетные данные температуры на высоте		
	Вход в резервуар	h = 10 мм	h = 100 мм	h = 210 мм	h = 10 мм	h = 100 мм	h = 210 мм
1	(36,63±0,5)	(36,8±0,5)	(36,9±0,5)	(36,4±0,5)	(36,3±0,5)	(36,8±0,5)	(37,0±0,5)
2	(36,50±0,5)	(36,4±0,5)	(36,6±0,5)	(36,1±0,5)	(37,0±0,5)	(36,1±0,5)	(36,1±0,5)
3	(36,31±0,5)	(36,3±0,5)	(36,4±0,5)	(36,1±0,5)	(36,1±0,5)	(35,8±0,5)	(36,8±0,5)

Таблица 2.4

**Экспериментальные значения температуры внутренней стенки резервуара в области жидкости при режиме выстаивания**

Время проведения эксперимента, мин	Экспериментальные значения температуры внутренней стенки резервуара в области жидкости				Расчетные данные температуры на высоте		
	Вход в резервуар	h = 10 мм	h = 100 мм	h = 210 мм	h = 10 мм	h = 100 мм	h = 210 мм
0	(31,6±0,5)	(31,6±0,5)	(32,4±0,5)	(30,0±0,5)	(31,2±0,5)	(33,0±0,5)	(30,1±0,5)
20	(30,9±0,5)	(30,7±0,5)	(32,4±0,5)	(27,9±0,5)	(30,2±0,5)	(32,4±0,5)	(28,5±0,5)
35	(30,1±0,5)	(30,1±0,5)	(32,3±0,5)	(26,8±0,5)	(28,8±0,5)	(32,4±0,5)	(26,8±0,5)

Что касается сравнения значений датчиков температуры газового пространства и стенки на высоте 335 мм, то можно сделать вывод о том, что температура стенки в области газового пространства меньше температуры среды в резервуаре в области свободного пространства. Разность температур представлена в таблице 2.5 (данные в таблице выборочные).

Таблица 2.5

Экспериментальные значения температуры внутренней стенки резервуара в области газового пространства во время режима выстаивания

DS28_034	DS28_054	Разность показаний
Газовое пространство	h = 335 мм	$\Delta t = t_{г.пр} - t_{ст}$
(29,2±0,5)	(17,7±0,5)	(11,5±0,5)
(28,4±0,5)	(18,6±0,5)	(9,8±0,5)
(27,6±0,5)	(18,0±0,5)	(9,6±0,5)
(22,4±0,5)	(12,6±0,5)	(9,8±0,5)
(19,7±0,5)	(9,4±0,5)	(10,3±0,5)

Из полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что в области газового пространства вблизи поверхности жидкости температура стенок близка (и даже может быть выше) к значению температуры газового пространства. Вдали от поверхности жидкости температура стенок ниже [94].

Это говорит о том, что в свободном пространстве резервуара происходит свободное движение газовой смеси (наблюдается естественная конвекция). Благодаря этому происходит разное прогревание поверхности внутренней стенки резервуара, следовательно, нельзя при тепловых расчетах руководствоваться общим представлением о том, что температура внутренней стенки резервуара

равна температуре газового пространства и тем более температуре окружающей среды [94].

Выводы по результатам эксперимента № 1:

1. Задача протаивания и промерзания влажного грунта под резервуаром осесимметричная, поэтому достаточно устанавливать датчики температуры грунта только по радиусу резервуара.

2. Процессы протаивания и промерзания влажного грунта идут по разным температурно-временным кривым.

3. При проведении эксперимента, для достижения его чистоты, необходимо укладывать теплоизоляцию на поверхность грунта, чтобы избежать промерзания грунта от отрицательной температуры окружающего воздуха.

При проведении численного моделирования на верхней границе в области резервуара можно задавать условие равенства температуры горячего теплоносителя (для каждого временного шага разная температура, которая определяется решением уравнения теплового баланса) или значение теплового потока, а за областью резервуара – граничное условие 3 рода (взаимодействие с окружающей средой).

## **Эксперимент №2**

При проведении эксперимента средняя температура воздуха внутри камеры составляет минус 7,36 °С.

Начальная температура грунта одинакова в каждой его точке и составляет минус 7 °С .

Средняя температура горячего теплоносителя равна 35 °С (датчик DS28\_036 установлен внутри резервуара на входе).

Во время проведения эксперимента общее число температурных датчиков составило 44, из них 36 установлены в грунте, остальные 8 –

в исследуемом резервуаре. Координаты температурных датчиков, установленных в грунте и резервуарах, указаны в таблице 2.6.

Таблица 2.6

## Координаты датчиков в эксперименте № 2

	Номер датчика	r, мм	z, мм
1	2	3	4
1.	DS28_033	19	-30
2.	DS28_041	40	-32
3.	DS28_044	55	-38
4.	DS28_045	161	-28
5.	DS28_046	205	-35
6.	DS28_047	218	-28
7.	DS28_048	243	-28
8.	DS28_010	258	-28
9.	DS28_020	2	-88
10.	DS28_023	15	-88
11.	DS28_008	50	-88
12.	DS28_007	68	-88
13.	DS28_028	107	-93
14.	DS28_019	145	-89
15.	DS28_002	173	-83
16.	DS28_022	245	-80
17.	DS28_004	262	-80
18.	DS28_020	2	-88
19.	DS28_012	21	-123
20.	DS28_026	37	-132
21.	DS28_042	47	-132
22.	DS28_030	88	-130
23.	DS28_032	130	-130
24.	DS28_031	168	-127
25.	DS28_027	265	-123
26.	DS28_001	203	-123
27.	DS28_016	235	-115
28.	DS28_005	258	-127
29.	DS28_056	5	-211
30.	DS28_009	23	-175
31.	DS28_014	45	-175
32.	DS28_011	93	-175
33.	DS28_017	131	-175
34.	DS28_021	171	-175

Продолжение таблицы 2.6

1	2	3	4
35.	DS28_024	210	-175
36.	DS28_003	245	-175
37.	DS28_034	Газовое пространство	
38.	DS28_036	Вход в резервуар	
39.	DS28_038	Воздух в камере	
40.	DS28_049	Датчик в резервуаре на высоте $h = 100$ мм	
41.	DS28_053	Датчик в резервуаре на высоте $h = 210$ мм	
42.	DS28_054	Датчик в резервуаре на высоте $h = 335$ мм	
43.	DS28_055	Датчик в резервуаре на высоте $h = 10$ мм	
44.	DS28_057	Резервуар для нагрева	

**Влажность грунта.** Как было указано выше, влажность грунта определялась методом высушивания до постоянной массы, согласно *ГОСТ 5180-84*. Для этого, образец грунта, упакованный плотно в фольге или герметичной упаковке, был взвешен. Затем образец грунта помещался в сушильный шкаф при температуре  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  на 3 часа. После повторного взвешивания образец грунта заново помещался в сушильный шкаф на 10 – 15 минут. И повторно взвешивался. Высушивание производилось до получения разности масс грунта при двух последующих взвешиваниях не более 0,02 г. [72].

Также чтобы убедиться, что влажность одинакова по глубине весь лоток был разбит на 5 зон (рисунок 2.8), из которых были взяты пробы грунта – 7 проб из каждой лунки (рисунок 2.9). Общая глубина грунта составляет 250 мм.

Результаты измерений влажности грунта представлены в таблице 2.8.

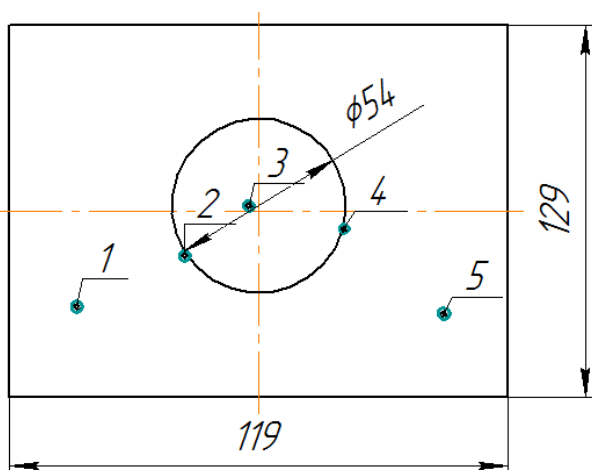


Рисунок 2.8 – Нумерация лунок

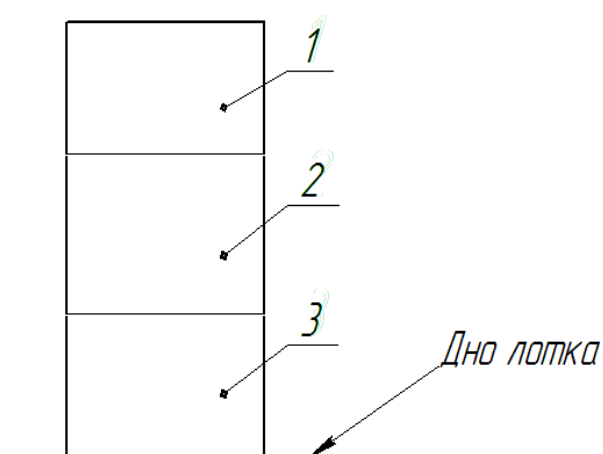


Рисунок 2.9 – Общий принцип нумерации образцов грунта по высоте

Таблица 2.8

## Протокол измерений влажности в эксперименте

Номер образца	Масса влажного грунта, г	Масса сухого грунта (первичное взвешивание), г	Масса сухого грунта (повторное взвешивание), г	Влажность, %
1	2	3	4	5
1.1	44,864	37,314	37,311	20,24
1.2	52,010	43,410	43,414	19,80
1.3	53,482	43,699	43,704	22,37
1.4	52,387	42,826	42,834	22,30
1.5	52,025	42,272	42,271	23,07
1.6	45,047	36,253	36,239	24,31
1.7	41,319	33,283	33,328	23,98
2.1	47,254	39,376	39,366	20,04
2.2	58,776	48,500	48,479	21,24
2.3	45,295	37,306	37,311	21,41
2.4	53,817	44,756	44,760	20,25
2.5	53,879	44,110	44,110	22,15
2.6	46,730	38,142	38,144	22,52
2.7	53,855	43,680	43,680	23,29
3.1	47,665	37,420	37,425	19,36
3.2	47,760	40,533	40,538	17,83
3.3	50,817	42,015	42,016	20,95
3.4	43,100	36,104	36,110	19,38
3.5	40,758	33,557	33,537	16,59

Продолжение таблицы 2.8

1	2	3	4	5
3.6	41,083	33,510	33,513	22,60
3.7	39,502	32,554	32,557	21,34
4.1	41,408	34,336	34,336	20,60
4.2	40,983	34,180	34,181	19,90
4.3	35,168	29,038	29,038	21,11
4.4	34,577	28,262	28,261	22,35
4.5	44,610	37,003	37,006	20,56
4.6	53,055	43,772	43,773	21,21
4.7	47,083	38,610	38,606	21,96
5.1	41,939	34,884	34,887	20,22
5.2	51,091	42,199	42,180	21,13
5.3	64,659	52,855	52,854	22,34
5.4	44,996	36,929	36,929	21,84
5.5	39,678	33,252	33,254	19,33
5.6	37,833	31,204	31,203	21,25
5.7	37,800	31,329	31,329	20,66

Согласно данным, приведенным в таблице 2.9, можно сделать вывод о том, что распределение влаги в исследуемом грунте равномерно и средняя влажность равна 21,12 %.

Таблица 2.9

Средняя влажность грунта по лункам и слоям в исследуемых областях

Исследуемая область	Влажность, %
1	2
Лунка 1	22,30
Лунка 2	21,60
Лунка 3	19,70
Лунка 4	21,01
Лунка 5	20,97
Средняя влажность по лункам	21,12

Продолжение таблицы 2.9

1	2
Слой 1	20,09
Слой 2	19,98
Слой 3	21,64
Слой 4	21,22
Слой 5	20,34
Слой 6	22,38
Слой 7	22,25
Средняя влажность по слоям	21,13
Средняя влажность грунта	21,12

### **Физические свойства используемого нефтепродукта.**

Исследование физических свойств нефти было проведено в лаборатории физики жидкостей и нанотехнологий кафедры механики многофазных систем Тюменского государственного университета.

#### *Плотность нефти*

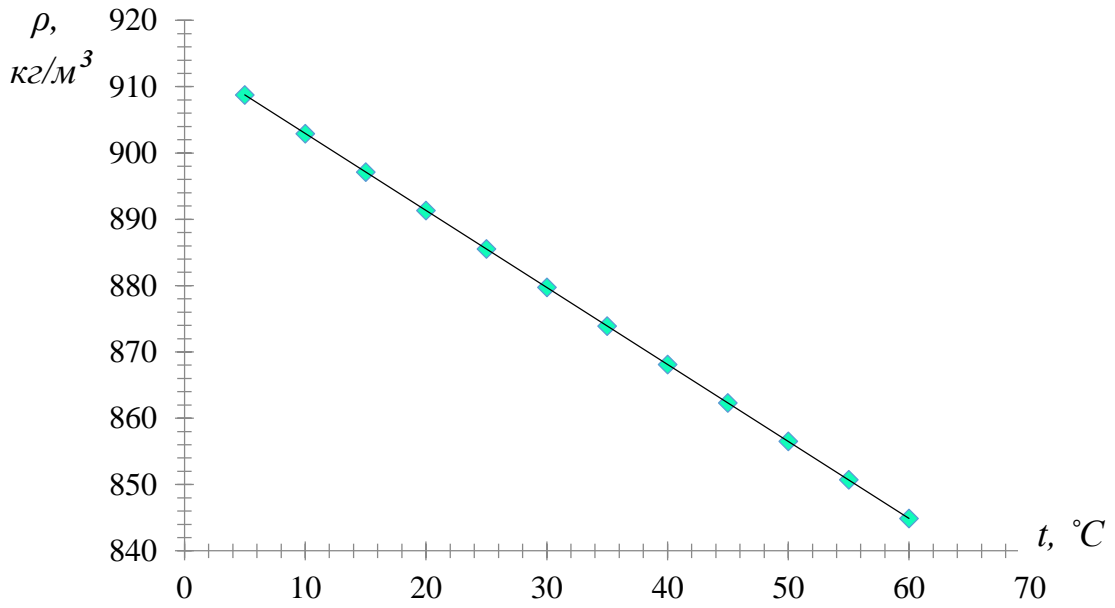
При температуре 20 °С плотность нефти равна 891,34 кг/м<sup>3</sup>, при 40 °С – 868,13 кг/м<sup>3</sup>. Таким образом, для исследуемой нефти справедлива следующая зависимость плотности от температуры:

$$\rho_t = 891,34 \cdot [1 + 0,001302 \cdot (20 - t)],$$

где  $t$  – температура нефти, °С.

График зависимости плотности нефти от температуры приведен на рисунке 2.10.



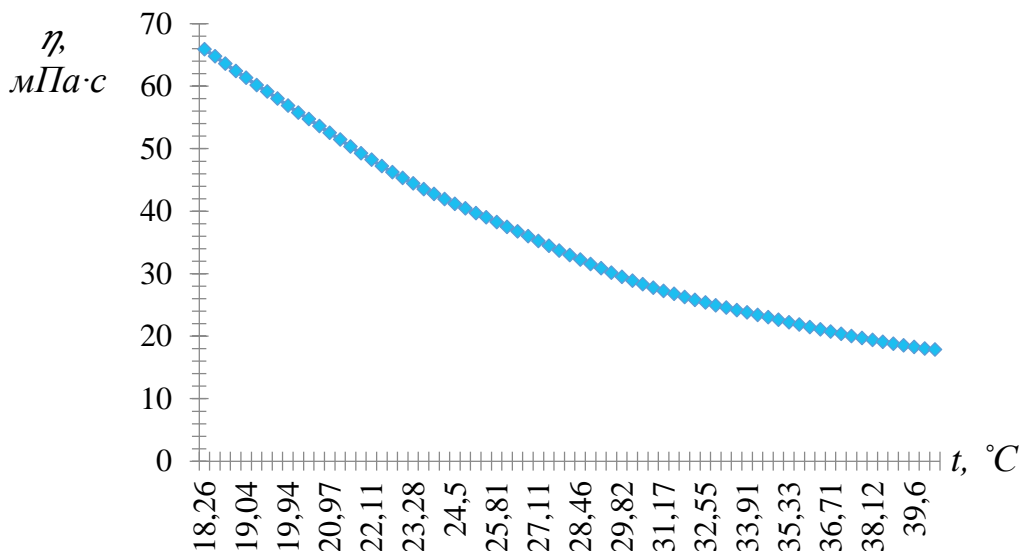


**Рисунок 2.10 – График зависимости плотности нефти от температуры**

### *Вязкость нефти*

Зависимость динамической вязкости нефти от температуры, график которой представлен на рисунке 2.11, аппроксимируется выражением:

$$\mu_t = 0,00004 \cdot t^3 + 0,00683 \cdot t^2 - 1,23121 \cdot t + 67,25394$$

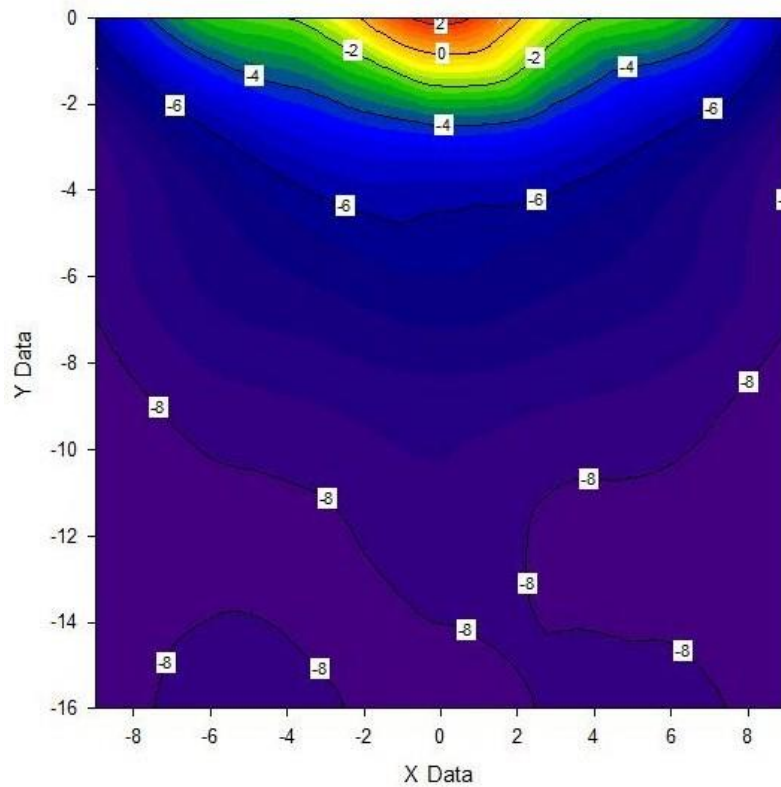


**Рисунок 2.11 – График зависимости динамической вязкости нефти от температуры**

### Температурные поля оттаившего грунта под резервуаром.

Эксперимент №2 по протаиванию грунта длился в течение 9 часов. Результаты эксперимента представлены на рисунках 2.12-2.16.

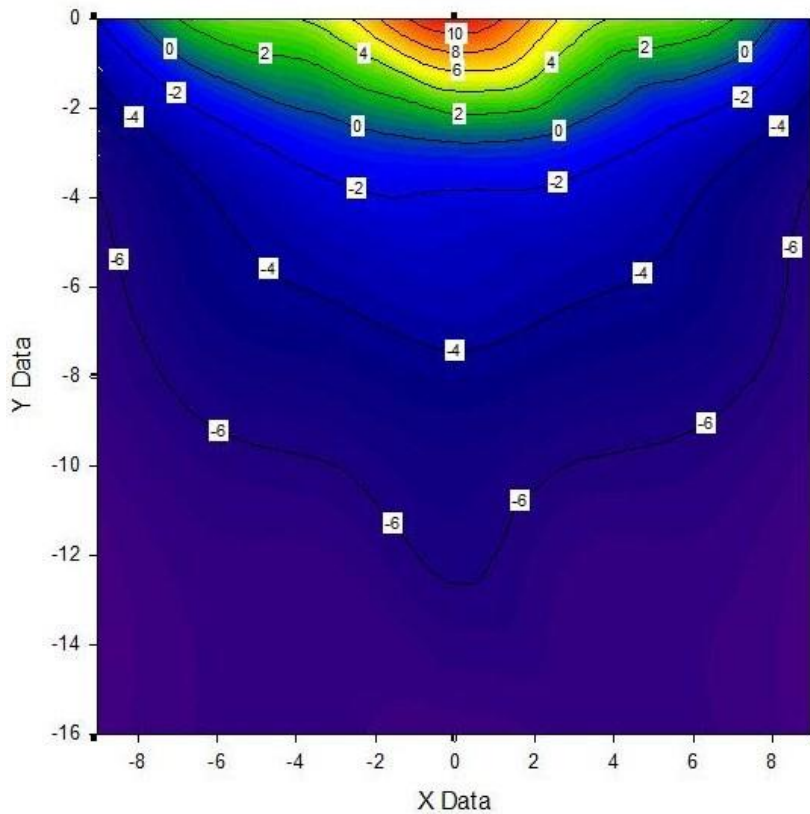
Грунт в разрезе через 10 минут прохождения эксперимента, показан на рисунке 2.12.



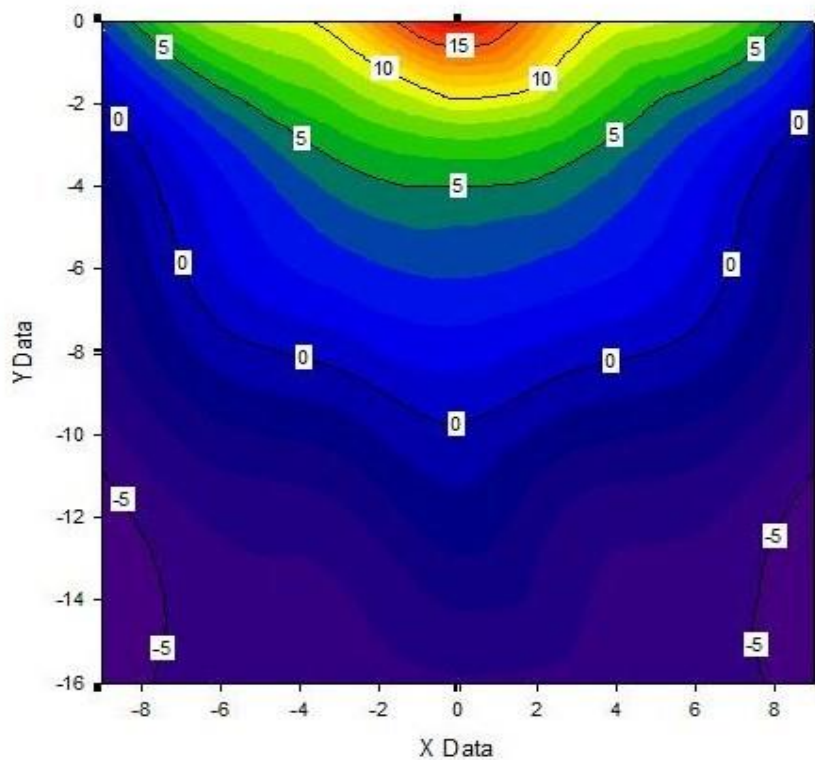
**Рисунок 2.12 - Температурное поле грунта спустя  $t = 10$  минут протаивания.**

Видно, что началось протаивание грунта и на глубине 1 см. наблюдаются нулевые температуры, начался фазовый переход.

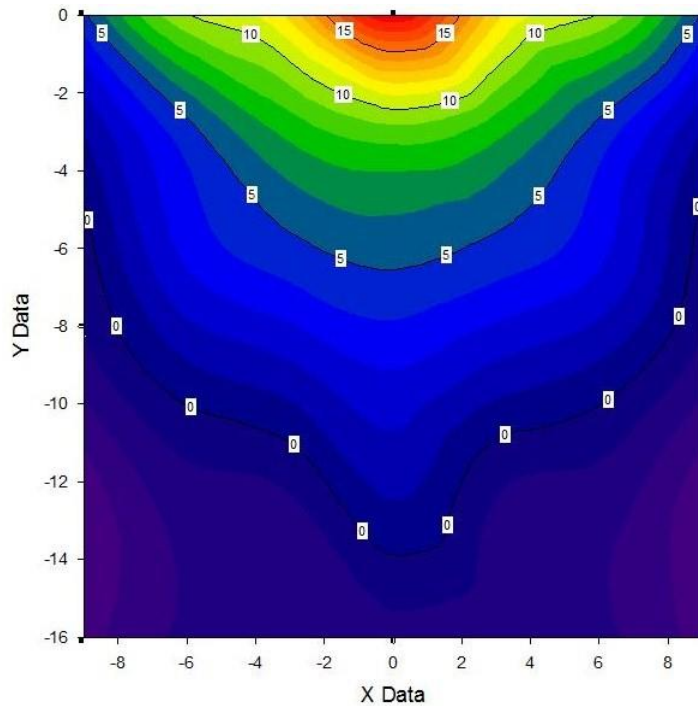
Через 90 минут, температуры продолжают расти ореол протаивания увеличивается и глубина протаивания увеличилась до 3 см (рисунок 2.13).



**Рисунок 2.13 - Температурное поле грунта при  $t = 1.5$  часа протаивания.**

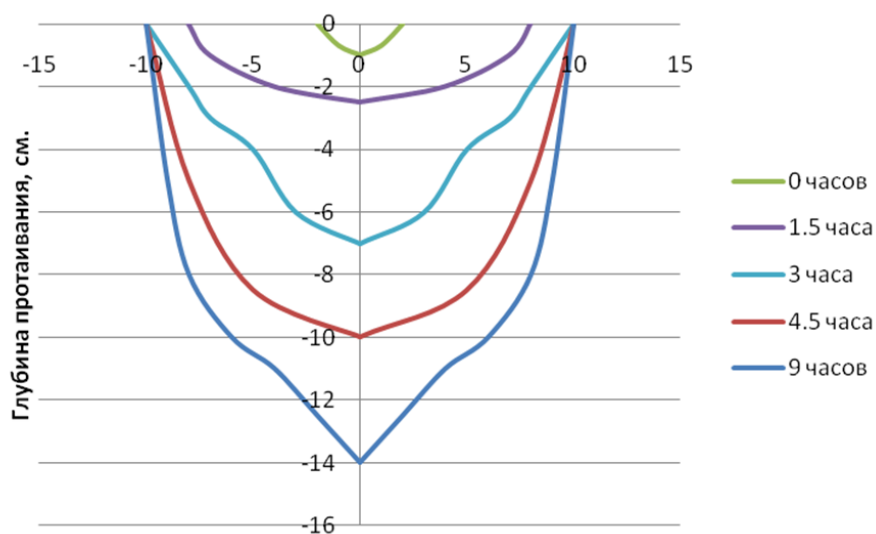


**Рисунок 2.14 - Температурное поле грунта при  $t = 4.5$  часа после включения подогрева.**



**Рисунок 2.15 - Температурное поле грунта при  $t = 9$  часа после протаивания.**

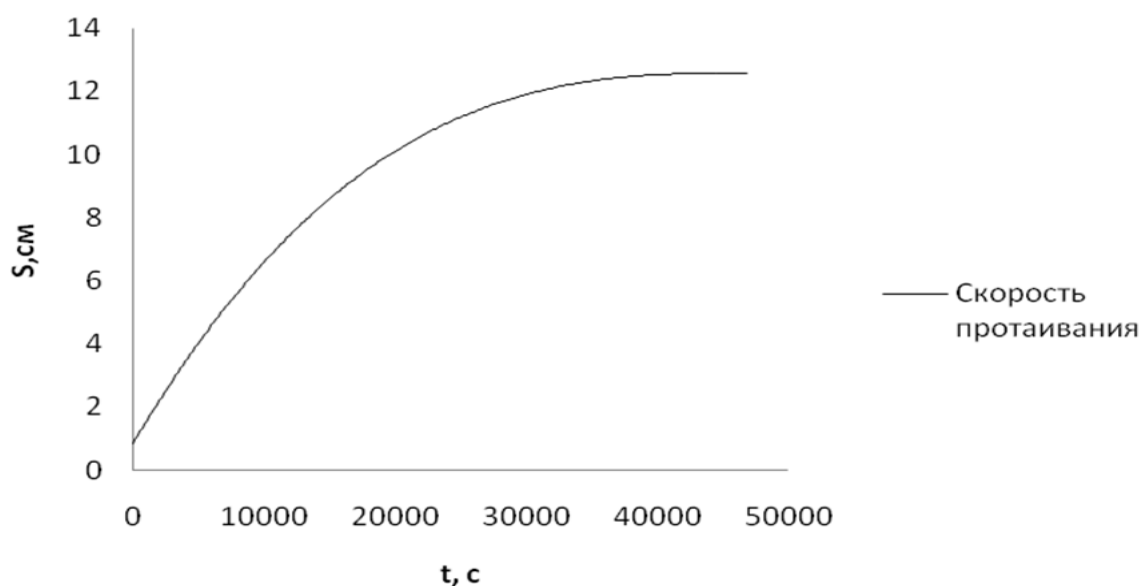
Результаты экспериментальных исследований температурного поля оттаившего грунта под «горячем» резервуаром (движение фронта протаивания, нулевая изотерма) приведены на рисунке 2.16.



**Рисунок 2.16 - Движение фронта протаивания.**

На этом графике приведена динамика изменения нулевой изотермы с течением времени. Зависимость ореола протаивания от времени носит сложный характер. Из графика видно, что наибольшее изменение величины талой зоны происходит в первые 4 часа, а затем рост ореола протаивания замедляется. В конце эксперимента ореол протаивания достиг 14 см.

На рисунке 2.17 приведена скорость протаивания грунта под модельным резервуаром. Из графика видно что наибольшая скорость протаивания грунта наблюдается в первые 4 часа, затем скорость с течением времени стабилизируется и становится постоянной.



**Рис. 2.17 - Динамика изменения скорости протаивания.**

### **Эксперимент №3 - 6**

Остальные эксперименты по протаиванию грунта имели одинаковые профили протаивания. Среднее время эксперимента составляет около 9 часов. Максимальная глубина протаивания составила 155 мм (температурный датчик DS28\_001).

Изменение температурного поля в грунте представлено на рисунках 2.18 – 2.20 (эксперимент №3).

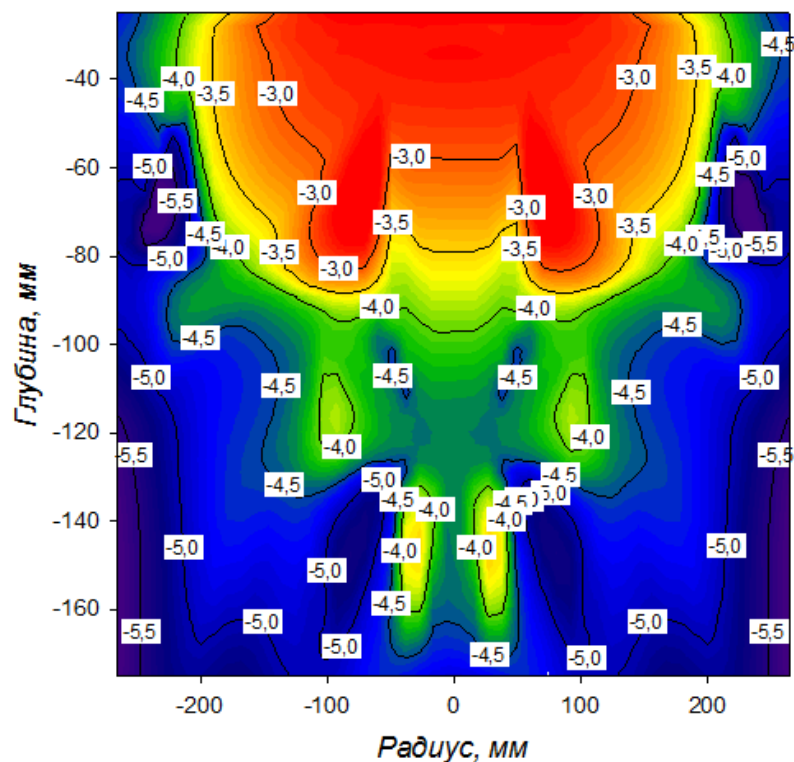


Рисунок 2.18 – Температурное поле грунта в момент времени 15:30

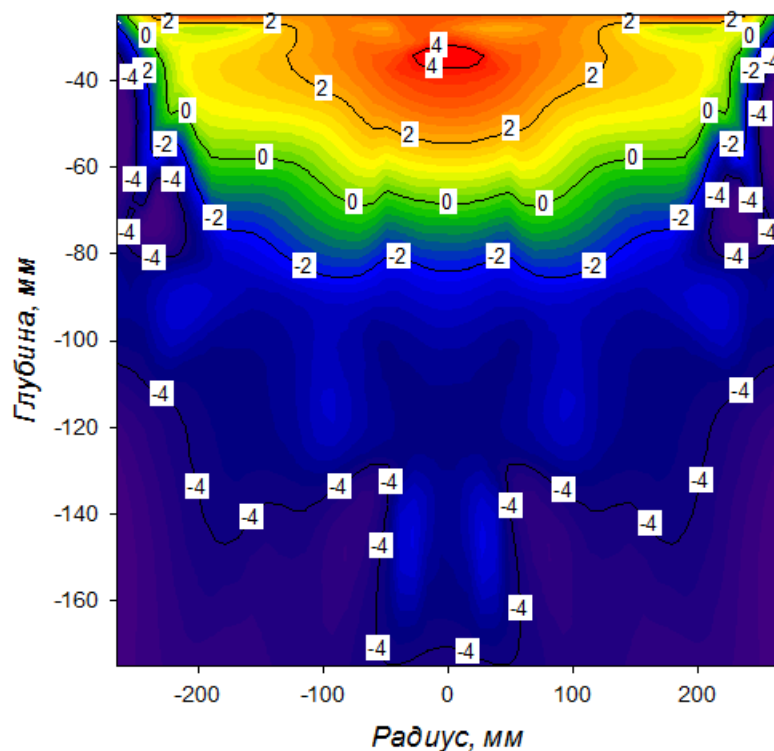
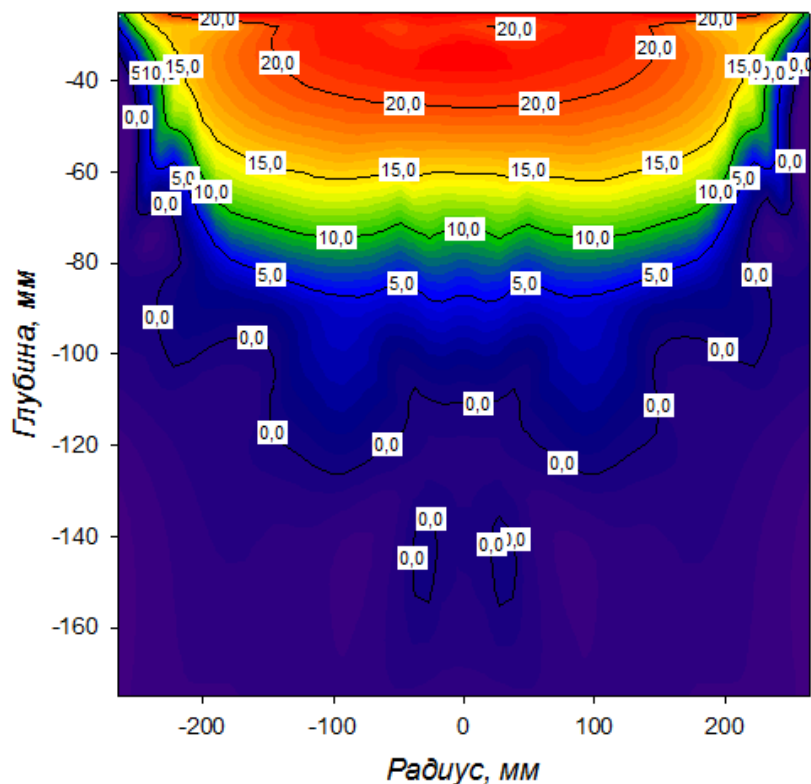


Рисунок 2.19 – Температурное поле грунта в момент времени 17:00



**Рисунок 2.20 – Температурное поле грунта в момент времени 20:12**

Как и следовало ожидать, распределение температур и фронт плавления (изотерма  $T = 0^{\circ}\text{C}$ ) почти симметричны относительно вертикальной оси, проходящей через центр модели резервуара. Небольшие отклонения от симметрии можно объяснить неизбежными погрешностями эксперимента: неоднородностью грунта, небольшим смещением датчиков температуры в процессе подготовки и проведения эксперимента, разбросом параметров датчиков и т.п. Однако неожиданным оказывается изменение формы фронта плавления со временем. Вначале, как и должно быть, фронт имеет форму овала с плавно и монотонно меняющимся радиусом кривизны. Но через 1.5 часа в центре фронта начинается формирование выступа ("языка"), который со временем растет, и в конце прогрева фронт имеет четко выраженную центральную зону, продвинутую далеко вперед по сравнению с боковыми участками [90, 91, 95].

Объяснить это можно тем, что т.к. объем воды меньше объема льда, в оттаявшем грунте появляются поры, через которые талая вода движется вниз к центру фронта плавления, возникает конвективный перенос тепла, из-за чего увеличивается скорость протаивания.



## Выводы по главе II.

1. Создана уникальная установка, позволяющая определять температурное поле в мерзлом грунте и определять глубину протаивания под модельным резервуаром.

2. Результаты эксперимента подтвердили суждение о том, что задача о протаивании грунта под горячим резервуаром является осесимметричной: в центре резервуара температура имеет максимальное значение и уменьшается по мере отдаления от оси резервуара.

3. Экспериментально обнаружено, что при прогреве сверху замороженного влажного грунта возможно возникновение вертикального фильтрационного потока талой воды, и, благодаря этому, существенное (примерно в два раза) увеличение средней скорости движения фронта протаивания [91].

4. Проведены ряд экспериментов, которые показывают зависимости температуры нефти и газового пространства. Экспериментально выявлено, что в первые моменты закачки горячего нефтепродукта в холодный резервуар температура нефти резко подает так как нефтепродукт нагревает стенки холодного металлического резервуара, а затем растет и достигает своего максимального значения. В режиме выстаивания температура нефти уменьшается по экспоненциальной зависимости [93].

5. Изменение температуры газового пространства носит иной характер: в режиме закачки температура растет постоянно, однако, когда нефть достигла максимальной температуры и начался процесс выстаивания, температура газового пространства продолжала расти в течение некоторого времени (15-20 минут), что объясняется изменением температуры в связи с испарением нефтепродукта (процесс теплопереноса с поверхности «зеркала» нефтепродукта)

и достигнув максимального значения (в нашем случае - 24°C) также уменьшается по экспоненциальной зависимости. Этот эксперимент подтверждает сложную картину конвективных потоков газа в области газового пространства внутри резервуара [93].

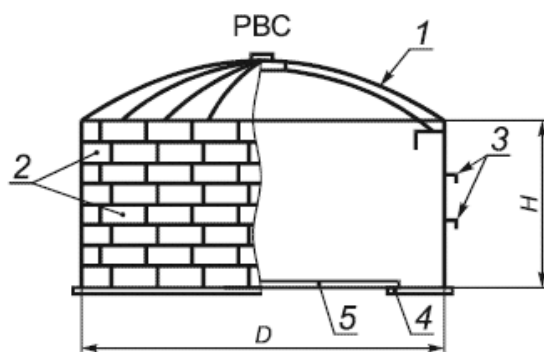
6. При исследовании внутренней температуры стенки резервуара можно сделать следующие выводы: температура стенки в области жидкости равна температуре горячего теплоносителя; температура стенки в области газового пространства меньше температуры среды в резервуаре в области свободного пространства. Это еще раз подтверждает сложность движения конвективных потоков в области газового пространства и требует дополнительных исследований [93].

## Глава III. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В РЕЗЕРВУАРАХ

### 3.1 Расчет температуры теплоносителя при эксплуатационных режимах резервуара

Основными особенностями проектирования, строительства и эксплуатации на мерзлых грунтах являются необходимость учета и регулирования теплообмена с сооружениями и с окружающей внешней средой. Тепловое состояние нефтепродукта, определяется процессами тепломассопереноса в самом нефтепродукте, газовоздушном пространстве резервуара и окружающей среде.

**Уравнение теплового баланса эксплуатируемого резервуара.**



**Рисунок 3.1 - Резервуар вертикальный стальной.**

**Примечание: 1 - каркас крыши; 2 - пояса стенки; 3 - промежуточные кольца жесткости; 4 - кольцо окраек; 5 - центральная часть днища.**

Нефтяные резервуары (рис. 3.1) представляют собой емкости различных размеров, предназначенные для накопления, кратковременного хранения и учета нефтепродукта. Резервуары эксплуатируются в широком диапазоне температур без теплоизоляции и

подвергаются переменным температурным воздействиям под влиянием колебаний температуры окружающей среды и солнечной радиации.

Для тепловых расчетов при хранении и отпуске нефтепродуктов необходимо знать начальную температуру продукта, которая зависит от времени хранения, от температуры окружающей среды и т.д. Так как учесть все факторы, от которых зависит температура нефтепродукта в резервуаре, трудно, то ее определяют с некоторой степени вероятности для этого при любом тепловом расчете основополагающим уравнением является уравнение теплового баланса. Запишем данное уравнение для нашего случая [95]

$$G \cdot \rho \cdot c \cdot (T_{cp} - T) \cdot dt - k_t \cdot S \cdot (T - T_0) \cdot dt = (V_0 \cdot \rho \cdot c + G \cdot t \cdot \rho \cdot c + m_0 c_0) dT, \quad (3.1)$$

где  $G$  - скорость закачки (производительность подачи теплоносителя),  $\frac{m^3}{c}$ ;  $G \cdot t \cdot \rho$  - масса закачиваемой воды, кг;  $V_0$  - объем теплоносителя в резервуаре, находящийся в момент начала данного этапа закачки,  $m^3$ ;  $m_0$  - масса пустого резервуара, кг;  $c$ ,  $c_0$  - теплоемкость теплоносителя и материала резервуара (стали),  $\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$ ;  $t$  - текущее время, с;  $S = S_{дна} + S_{кровли} + S_{бок.стены}$  - полная поверхность охлаждения емкости (сумма площадей кровли, днища и стенки),  $m^2$ ;  $k_t$  - коэффициент теплопередачи от резервуара в окружающую среду через стенки, днище и кровлю резервуара,  $\frac{Вт}{m^2 \cdot ^\circ C}$ ;  $T_{cp}$  - начальная температура подаваемой среды (далее- теплоносителя) при закачке,  $^\circ C$ ;  $T$  - текущее значение температуры теплоносителя в резервуаре в данный момент времени,  $^\circ C$ ;  $T_0$  - температура окружающей среды,  $^\circ C$ .

Если необходимо учитывать фазовые переходы, происходящие внутри резервуара во время испытаний или эксплуатации резервуара в зимнее время, то в уравнении теплового баланса (3.1) необходимо дописать дополнительный член, учитывающий данный процесс. Так, например, при гидравлических испытаниях в зимнее время вода

может замерзнуть, следовательно, в уравнении (3.1) появится член, учитывающий фазовое превращение 1 рода: замерзание воды и оттаивание при последующем заливе более теплой воды, чем находящейся в резервуаре.

При образовании льда в переохлажденной воде выделяется теплота плавления в количестве  $\lambda$  на каждую единицу массы образовавшегося льда. Это тепло идет на нагревание льда и воды. Процесс прекратится, когда выделится количество тепла, достаточное для нагревания системы до температуры плавления. В силу закона сохранения энергии, так как все тепло в конечном счете идет только на нагревание, при расчете можно считать, что сначала вся вода нагревалась до температуры плавления  $T_{пл}$ , а потом образовалось необходимое количество льда при температуре  $T_{пл}$ . На основании уравнения теплового баланса можно написать:

$$m \cdot \lambda = M \cdot c \cdot (T - T_{пл}).$$

Преобразуем уравнение (3.1) к удобному для интегрирования виду. Для этого произведем замену:  $t_0 = \frac{m_0 c_0}{G \cdot \rho \cdot c}$  - характерное время;

$t_1 = \frac{V_0}{G}$  - время, в течение которого будет производиться заполнение;

$k = \frac{k_i S}{G \cdot \rho \cdot c}$  - безразмерный коэффициент теплообмена (параметр

Шухова);  $\tau = \frac{t}{t_0}$  - текущее безразмерное время;  $\tau' = \frac{t_1}{t_0}$  - безразмерное

время, необходимое для заполнения резервуара на очередной уровень.

В результате замены уравнение (3.1) принимает вид:

$$(T_{cp} - T)d\tau - k(T - T_0)d\tau = (\tau + \tau' + 1)dT. \quad (3.2)$$

Разделяя переменные в уравнении (3.2), получаем

$$\frac{dT}{(T_{cp} - T) - k(T - T_0)} = \frac{d\tau}{\tau + \tau' + 1}. \quad (3.3)$$

Для удобства интегрирования введем переменные:

$$x = T_{cp} - T - k \cdot (T - T_0); \quad y = \tau + \tau' + 1;$$

$$dx = -(k+1) \cdot dT; \quad dy = d\tau.$$

$$dT = -\frac{1}{(k+1)} \cdot dx;$$

Уравнение (3.3) принимает вид:

$$-\frac{dx}{(k+1) \cdot x} = \frac{dy}{y}. \quad (3.4)$$

Интегрируя получаем общее решение уравнения (3.3):

$$\frac{1}{x} = C_1 \cdot y^{k+1}, \quad (3.5)$$

где  $C_1$  - константа интегрирования, которая должна быть определена из граничных условий.

Известно, что в начальный момент времени ( $t=0, \tau=0$ ) при закачке температура теплоносителя конечная равна температуре теплоносителя, находящегося в резервуаре  $T=T_k$ . В начальный момент заполнения, когда резервуар пуст, температура в начальный момент будет равна температуре окружающей среды  $T=T_0$ . Исходя из этого, переменные интегрирования будут равны:

$$y = \tau' + 1, \quad x = T_{cp} + k \cdot T_0 - T_k \cdot (1+k). \quad (3.6)$$

Подставляя (3.6) в (3.5), определяем константу  $C_1$ :

$$C_1 = \frac{(\tau' + 1)^{-(k+1)}}{T_{cp} + k \cdot T_0 - T_k \cdot (1+k)}.$$

Закон изменения температуры во время заполнения резервуара в зависимости от производительности насоса и времени заполнения выглядит следующим образом [95]

$$T = \frac{T_{cp} + k \cdot T_0}{k+1} - \frac{(\tau' + 1)^{k+1} \cdot (T_{cp} + k \cdot T_0 - T_k \cdot (k+1))}{(k+1) \cdot (1 + \tau + \tau')^{k+1}}. \quad (3.7)$$

Уравнение (3.7) позволяет определить температуру теплоносителя в любой момент времени в процессе закачки любого

резервуара. Пользуясь этим уравнением можно при заданной температуре определить время, в течение которого температура изменится от начальной до допустимой при различных скоростях закачки и объема резервуара.

Рассмотрим случай, когда происходит наполнение пустого резервуара. Это значит, что в уравнении (3.1)  $\tau' = 0$ , при разделении переменных уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{dT}{(T_{cp} - T) - k(T - T_0)} = \frac{d\tau}{\tau + 1} \quad (3.8)$$

Вводя переменные интегрирования  $y = \tau + 1$ ,  $x = T_{cp} - T - k \cdot T + T_0 \cdot k$  и граничные условия  $T = T_0$ , получим константу интегрирования равной

$$C_1 = \frac{1}{T_{cp} - T_0}.$$

Закон изменения температуры теплоносителя при заполнении пустого резервуара имеет вид [95]:

$$T = \frac{T_{cp} + k \cdot T_0}{k + 1} - \frac{T_{cp} - T_0}{(k + 1) \cdot (1 + \tau)^{k+1}} \quad (3.9)$$

Проведем проверку выведенной формулы (3.9).

При  $\tau = 0$  конечная температура теплоносителя должна быть равна температуре окружающей среды

$$T = \frac{T_{cp} + k \cdot T_0}{k + 1} - \frac{T_{cp} - T_0}{k + 1} = \frac{T_{cp} + k \cdot T_0 - T_{cp} - T_0}{k + 1} = \frac{T_0 \cdot (k + 1)}{k + 1} = T_0.$$

Если текущее безразмерное время очень большое  $\tau \rightarrow \infty$ , тогда формула будет иметь вид  $T = \frac{T_{cp} + k \cdot T_0}{k + 1}$ .

Если  $k = 1$ , тогда конечная температура закачиваемого теплоносителя равна средней температуре окружающей среды и начальной температуре теплоносителя  $T = \frac{T_{cp} + T_0}{2}$ .

Если  $k = 0$ , тогда  $T = T_{cp}$ ,  $k \rightarrow \infty$ ,  $T = \frac{T_0 + \frac{T_{cp}}{k}}{1 + \frac{1}{k}} = T_0$ .

Изменение конечной температуры теплоносителя при закачке в резервуар во время эксплуатации в зависимости от безразмерного коэффициента теплообмена будет иметь вид:

$$\frac{dT}{dk} = \frac{T_0 \cdot (k+1) - (T_{cp} + k \cdot T_0)}{(k+1)^2} = \frac{T_0 \cdot k + T_0 - T_{cp} - k \cdot T_0}{(k+1)^2} = -\frac{T_{cp} - T_0}{(k+1)^2}.$$

Процесс охлаждения теплоносителя при эксплуатации резервуара (выстаивание) может быть описан, исходя из уравнения теплового баланса (3.1), составленного для заполненного резервуара:

$$-k_t \cdot S \cdot (T - T_0) \cdot dt = (V_0 \cdot \rho \cdot c + m_0 \cdot c_0) \cdot dT. \quad (3.10)$$

В уравнении вместо времени заполнения резервуара появляется время выстаивания  $t'$ . Кроме того, объем теплоносителя и площадь теплопередачи не изменяется. Закон изменения температуры в этом случае может быть записан в виде [97, 98]

$$T = T_0 + (T_n - T_0) \cdot e^{-\frac{t'}{k}}, \quad (3.11)$$

где  $T_n$  - температура теплоносителя после заполнения резервуара, °C;

$$k' = \frac{(V_0 \cdot \rho \cdot c + m_0 \cdot c_0)}{k_t \cdot S} = \frac{t' + t_0}{k}.$$

Уравнение (3.11) представляют собой выражения, аналогичные известной формуле В.Г. Шухова для охлаждения резервуара. Однако в этой формуле имеются зависимые переменные производительность насоса, высота налива, время закачки.

Кроме того, в формуле В.Г. Шухова коэффициент теплопередачи  $k_t$  определяется по достаточно сложным уравнениям, учитывающим теплообмен между отдельными частями резервуара (днищем, крышей, стенками) и жидкостью в резервуаре.



В производственных условиях желательно иметь более простые уравнения или же номограммы, по которым можно быстро рассчитать или определять вероятное падение температуры при переменном расходе теплоносителя (закачка) и последующем охлаждении резервуара.

### 3.2 Описание методики по расчету коэффициентов теплопередачи через стенки резервуара

Температуру теплоносителя при закачке в резервуар и выстаивании можно определить по уравнениям (3.7), (3.9), (3.11). В данных уравнениях наибольшую сложность представляет собой нахождение безразмерного коэффициента теплообмена, в связи с тем, что в его формуле присутствует коэффициент теплопередачи  $k_t$ . Рассмотрим подробное описание как необходимо рассчитать данный коэффициент.

В уравнениях (3.7), (3.9), (3.11)  $T_0$  - температура окружающей среды для наземных резервуаров определяется по формуле [99, 100]

$$T_0 = \frac{S_z \cdot T_z + S_b \cdot T_e}{S}, \quad (3.12)$$

где  $S_z$  и  $S_b$  - поверхность резервуара, соприкасающаяся с грунтом (площадь днища) и воздухом (суммарная площадь стенок и кровли резервуара),  $m^2$ ;  $T_z$  и  $T_e$  - температура грунта и окружающего воздуха, находящегося в контакте с резервуаром,  $^{\circ}C$ ;

Площади поверхностей ограждающей конструкции резервуара находятся по следующим формулам:

- площадь днища  $S_z = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ ;

- площадь стенки  $S_{ст} = \pi \cdot D \cdot H$ , где  $H$  для определения площади резервуара, граничащей с продуктом, является высотой налива, а для определения площади, граничащей с газовым пространством - высота газового пространства;

- площадь кровли  $S_{кр} = \pi \cdot \left( H_{с.к.}^2 + \frac{D^2}{2} \right)$ , где  $H_{с.к.}$  - высота сферического купола, м.

купола, м.

Для резервуаров значение  $k_t$  должно быть вычислено с учетом характера теплопередачи через ограждающую конструкцию резервуара [29]:

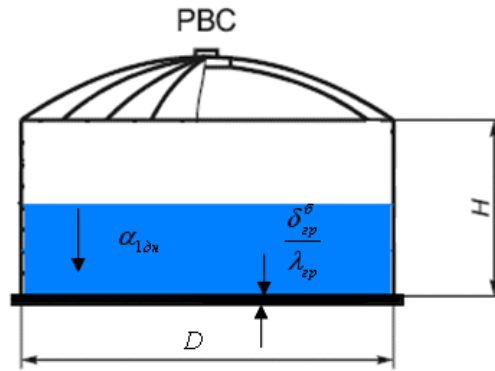
$$k_t = \frac{k_{\text{дн}} \cdot S_{\text{дн}} + k_{\text{ст.г.}} \cdot S_{\text{ст.г.}} + k_{\text{ст.ж.}} \cdot S_{\text{ст.ж.}} + k_{\text{кр}} \cdot S_{\text{кр}}}{S}, \quad (3.13)$$

где  $k_{\text{дн}}$ ,  $k_{\text{ст.г.}}$ ,  $k_{\text{ст.ж.}}$ ,  $k_{\text{кр}}$  - коэффициенты теплопередачи через днище, стенку в области газового и жидкого пространства, кровли резервуара,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ;

Рассмотрим нахождения коэффициентов теплопередачи через днище, стенку и кровлю подробно. Для расчета вышеуказанных коэффициентов необходимо задаться средним значением температуры внутренней стенки резервуара, затем данное значение уточняется методом последовательных приближений. По уравнению теплового баланса проверяем правильность выбора предварительной температуры стенки резервуара по формуле  $T_{\text{пр}} = T_n - \frac{k}{\alpha_1} \cdot (T_n - T_0)$ , где  $T_n$  - находим при условии

$$\begin{aligned} \text{если } \frac{T_{\text{нач}} - T_0}{T_{\text{кон}} - T_0} \leq 2, \text{ то } T_n &= 0,5 \cdot (T_{\text{нач}} + T_{\text{кон}}), \\ \text{если } \frac{T_{\text{нач}} - T_0}{T_{\text{кон}} - T_0} > 2, \text{ то } T_n &= T_0 + \frac{T_{\text{нач}} - T_{\text{кон}}}{\ln \frac{T_{\text{нач}} - T_0}{T_{\text{кон}} - T_0}}. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Так как в вышележащих формулах  $T_{\text{пр}}$  - искомая величина, то при определении температуры теплоносителя можно принять  $T_n = 0,5 \cdot (T_{\text{нач}} + T_{\text{кон}})$ . При получении конечной температуры в расчете необходимо пересчитать данную величину. При погрешности  $\varepsilon = 1 - \frac{T'}{T} \leq 1,5\%$  совпадение считать удовлетворительным.



**Рисунок 3.2 - Процесс передачи тепла через днище резервуара**

Для нахождения коэффициента теплопередачи **через днище** считаем, что предварительное значение температуры  $T'_{\text{дн}} = T_{\text{грунта}}$  [95, 100].

Коэффициент теплопередачи через днище находится по формуле

$$k_{\text{дн}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1\text{дн}}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{\pi \cdot \delta_{\text{грунта}}}{8\lambda_{\text{грунта}}}}, \quad (3.15)$$

где  $\delta_i$ ,  $\lambda_i$  - толщина и теплопроводность стальной стенки днища резервуара, изоляции и т.д.;  $\alpha_{1\text{дн}}$  - коэффициент теплообмена от теплоносителя через днище емкости;  $\lambda_{\text{грунта}}$  - коэффициент теплопроводности грунта фундамента,  $\delta_{\text{грунта}}$  - толщина песчаной части фундамента резервуара.

Так как резервуар не теплоизолирован, то  $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{\delta_{\text{дн}}}{\lambda_{\text{дн}}}$ .

Коэффициент теплообмена  $\alpha_{1\text{дн}}$  определяется по известным теплофизическим формулам [28]:

- во время выстаивания резервуара (процесс передачи тепла – свободная конвекция)

$$\alpha_{1\text{дн}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda_{\text{сп}}}{D_{\text{рез}}} \cdot (Gr \cdot Pr)_{\text{сп}}^{0.25} \cdot \left( \frac{Pr_{\text{сп}}}{Pr_{\text{ст.дн}}} \right)^{0.25}. \quad (3.16)$$

- во время заполнения резервуара (вынужденная конвекция, создаваемая скоростью закачки воды):

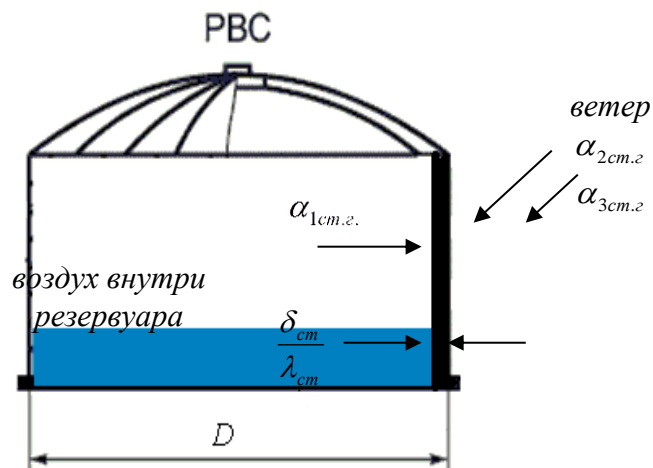
$$\text{при } Re \geq 5 \cdot 10^5 \quad \alpha_{10н} = 0.037 \cdot \frac{\lambda_{cp}}{H_{налива}} \cdot \sqrt{Re} \cdot (Pr)^{0.43} \cdot \left( \frac{Pr_{cp}}{Pr_{ст.дн}} \right)^{0.25}; \quad (3.17)$$

$$\text{при } Re < 5 \cdot 10^5 \quad \alpha_{10н} = 0.76 \cdot \frac{\lambda_{cp}}{H_{налива}} \cdot \sqrt{Re} \cdot (Pr)^{0.43} \cdot \left( \frac{Pr_{cp}}{Pr_{ст.дн}} \right)^{0.25}, \quad (3.18)$$

где  $\lambda_{cp}$  - коэффициент теплопроводности среды закачиваемого продукта при температуре продукта.

На рисунке 3.3 обозначен через вводимые коэффициенты процесс передачи тепла через стенку резервуара в области газового пространства.

Для нахождения коэффициента теплопередачи **через стенку в области газового пространства** считаем, что среднее значение температуры внутренней стенки резервуара  $T'_{см.г.} = T_0$  [95, 100].



**Рисунок 3.3 - Процесс передачи тепла через стенку резервуара в области газового пространства.**

Коэффициент теплопередачи находим по формуле (3.19) [97, 100]

$$k_{см.г.} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1см.г.}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_{2см.г.} + \alpha_{3см.г.}}}, \quad (3.19)$$

где  $\alpha_{1см.г.}$  - коэффициент теплообмена от теплоносителя к вертикальной стенке емкости определяют по следующим формулам [98].

• если  $Gr \cdot Pr \geq 10^9$  - турбулентный режим, тогда коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к внутренней стенке резервуара равен

$$\alpha_{1cm.z} = 0.76 \cdot \frac{\lambda_{\text{гoзoд}}}{H_{z.np}} \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.33} \cdot \left( \frac{Pr_{\text{гoзoд}}}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}; \quad (3.20)$$

• если  $Gr \cdot Pr < 10^9$  и  $Gr \cdot Pr > 10^3$  - ламинарный режим, тогда

$$\alpha_{1cm.z} = 0.15 \cdot \frac{\lambda_{\text{гoзoд}}}{H_{z.np}} \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.33} \cdot \left( \frac{Pr_{\text{гoзoд}}}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}. \quad (3.21)$$

При расчете безразмерного параметра Грасгофа характерным размером является высота газового пространства, которая изменяется в зависимости от скорости заполнения резервуара.

$\alpha_{2cm.z}$ ,  $\alpha_{3cm.z}$  - коэффициенты теплообмена за счет вынужденной конвекции, создаваемой скоростью ветра, и свободной, соответственно:

$$\text{при } Re < 10^4 \quad \alpha_{2cm.z} = 0.57 \cdot \frac{\lambda_{\text{гoзoд}}}{H} \cdot \sqrt{Re} \cdot (Pr_{\text{гoзoд}})^{0.38} \cdot \left( \frac{Pr_{\text{гoзoд}}}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}; \quad (3.22)$$

$$\text{при } Re \geq 10^4 \quad \alpha_{2cm.z} = 0.28 \cdot \frac{\lambda_{\text{гoзoд}}}{H} \cdot (Re)^{0.6} \cdot (Pr_{\text{гoзoд}})^{0.38} \cdot \left( \frac{Pr_{\text{гoзoд}}}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}. \quad (3.23)$$

$\alpha_{3cm.z}$  - находится через критерии подобия свободной конвекции ( $Gr$  и  $Pr$ ) для вертикальной поверхности [28]:

$$\alpha_{3cm.z} = B \cdot \frac{\lambda_{\text{гoзoд}}}{H} \cdot (Gr \cdot Pr_{\text{гoзoд}})^n. \quad (3.24)$$

Таблица 3.1.

Коэффициенты  $B$  и  $n$  при нахождении коэффициентов теплообмена

Вертикальное расположение		
$Gr \cdot Pr$	$B$	$n$
$10^3 - 10^9$	0.76	$\frac{1}{4}$
$> 10^9$	0.15	$\frac{1}{3}$
Горизонтальное расположение объекта		
$Gr \cdot Pr$	$B$	$n$
$10^3 - 10^7$	0.5	$\frac{1}{4}$
$> 10^7$	0.135	$\frac{1}{3}$

Если необходимо учитывать солнечную радиацию, тогда в уравнении (3.19), появится дополнительный член, учитывающий радиацию,

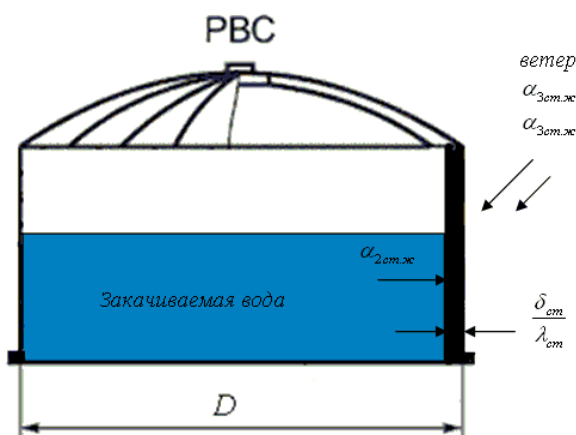
$$k_{см.з.} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1см.з.}} + \frac{\delta_{см}}{\lambda_{см}} + \frac{1}{\alpha_{2см.з.} + \alpha_{3см.з.} + \alpha_{4см.з.}}},$$

который находится по формуле [97, 100]:

$$\alpha_{4см.з.} = \frac{\varepsilon \cdot c_0 \cdot \left( \left( \frac{T_{см}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right)}{(T_{см} - T_0)}, \quad (3.25)$$

где  $\varepsilon$  - степень черноты стенки резервуара,  $c_0 = 5,67$  - постоянная Стефана-Больцмана;

На рисунке 3.4 обозначен через вводимые коэффициенты процесс передачи тепла через стенку резервуара в области жидкого пространства.



**Рисунок 3.4 - Процесс передачи тепла через стенку резервуара в области жидкости.**

Для нахождения коэффициента теплопередачи **через стенку в области жидкости** среднее значение температуры поверхности внутренней стенки резервуара равно температуре закачиваемого теплоносителя  $T'_{ст.ж.} = T_{cp}$ . Коэффициент теплопередачи находим по формуле [97, 98]

$$k_{ст.ж.} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1ст.ж.}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_{2ст.ж.} + \alpha_{3ст.ж.}}}, \quad (3.26)$$

где  $\alpha_{1ст.ж.}$  - коэффициент теплообмена от теплоносителя к вертикальной стенке резервуара, создаваемый потоком теплоносителя, находится по формулам:

- во время выстаивания резервуара (свободная конвекция) [28]

$$\alpha_{1ст.ж.} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda_{ср}}{D_{рез}} \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.25} \cdot \left( \frac{Pr_{ср}}{Pr_{ст.дн}} \right)^{0.25}. \quad (3.27)$$

- во время заполнения резервуара (вынужденная конвекция, создаваемая скоростью закачки воды):

$$\text{при } Re \geq 5 \cdot 10^5 \quad \alpha_{1ст.ж.} = 0.037 \cdot \frac{\lambda_{ср}}{H_{налива}} \cdot \sqrt{Re} \cdot (Pr)^{0.43} \cdot \left( \frac{Pr_{ср}}{Pr_{ст.дн}} \right)^{0.25}; \quad (3.28)$$

$$\text{при } Re < 5 \cdot 10^5 \quad \alpha_{1ст.ж.} = 0.76 \cdot \frac{\lambda_{ср}}{H_{налива}} \cdot \sqrt{Re} \cdot (Pr)^{0.43} \cdot \left( \frac{Pr_{ср}}{Pr_{ст.дн}} \right)^{0.25}. \quad (3.29)$$

Остальные расчеты производятся аналогично  $k_{ст.г.}$ . Характерным размером является  $h_{налива}$ .

На рисунке 3.5 обозначен через вводимые коэффициенты процесс передачи тепла через кровлю резервуара.

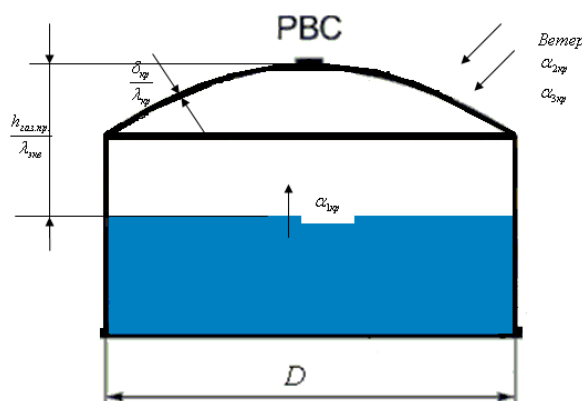


Рисунок 3.5 - Процесс передачи тепла через кровлю резервуара.



Для расчета коэффициента теплопередачи от теплоносителя в окружающую среду **через кровлю**  $k_{кр}$  необходимо знать:

- температуру «зеркала» теплоносителя в резервуаре принимаем равной средней температуре теплоносителя;
- температуру внутренней поверхности кровли принимаем равной температуре окружающего воздуха;
- температура газового пространства равна средней температуре окружающего воздуха и теплоносителя.

Коэффициент теплоотдачи находится по формуле [97, 98]:

$$k_{кр} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1кр}} + \frac{h_{газ.пр.}}{\lambda_{экв}} + \frac{\delta_{кр}}{\lambda_{кр}} + \frac{1}{\alpha_{2кр} + \alpha_{3кр}}}, \quad (3.30)$$

где  $\alpha_{1кр}$  -коэффициент теплообмена от зеркала теплоносителя в газовое пространство резервуара (за счет свободной конвекции) [29]:

$$\text{при } (Pr \cdot Gr) = 5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7, \text{ то } \alpha_{1к} \approx 5,466 \cdot \sqrt[3]{T_{зеркала} - T_{г.п.}}; \quad (3.31)$$

$$\text{при } (Pr \cdot Gr) > 2 \cdot 10^7, \text{ то } \alpha_{1к} \approx 1.14 \cdot \sqrt[3]{T_{зеркала} - T_{г.п.}}. \quad (3.32)$$

Определяем параметры Грасгофа ( $Gr = \frac{l^3 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T}{\nu^2}$ ) и Прандтля при средней температуре газового пространства (по данным для сухого воздуха).

За характерный параметр возьмем полную высоту газового пространства

$$h_{г.п.}^{полная} = h_{сегмента} + h_{г.п.};$$

$$h_{сегмента} = 2 \cdot h_{сф.конуса} \cdot \left( \frac{1}{4} - \frac{h_{конуса}^2}{2 \cdot D_{рез.}^2} \right), \quad (3.33)$$

где  $h_{сф.конуса}$  - высота сферического конуса, которая определяется по типовому проекту резервуара.

По формуле  $\lambda_{\text{экв}} = \lambda_c \cdot \varepsilon_\kappa$  определяем эквивалентный коэффициент теплопроводности газовой смеси, где  $\varepsilon_\kappa$  - коэффициент конвекции,  $\lambda_c$  - коэффициент теплопроводности газовой смеси.

$$\varepsilon_\kappa = 0,18 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25}. \quad (3.34)$$

Если  $\varepsilon_\kappa < 10^3$ , тогда принимается  $\varepsilon_\kappa = 1$ .

По формуле [29]  $\lambda_c = \lambda_{\text{возд}} \cdot (1 - C_1) + \lambda_{\text{сп}} \cdot C_1$  определяем коэффициент теплопроводности газовой смеси при влажности воздуха в газовом пространстве резервуара.

Коэффициенты теплообмена  $\alpha_{2\text{кр}}, \alpha_{3\text{кр}}$  находятся аналогично коэффициенту теплообмена в области газового пространства. При нахождении  $\alpha_{2\text{кр}}$  процесс передачи тепла рассматривается, как вынужденная конвекция при обтекании плоской поверхности, при нахождении  $\alpha_{3\text{кр}}$ , как свободная конвекция для горизонтальных объектов [28].

### **Алгоритм расчета конечной температуры теплоносителя [97, 98]:**

1. определение технико-экономических характеристик стального резервуара для нефти и нефтепродуктов: высота и диаметр резервуара, масса ограждающей конструкции, толщины стенок резервуара и др.;
2. определение максимального уровня налива продукта в резервуар;
3. нахождение площадей поверхности дна резервуара, кровли и стенки, контактирующей с продуктом и газовым пространством и общей площади;
4. определение приведенной температуры окружающей среды;
5. определение физических свойств среды (нефти или воды), которая возможно зависит от температуры, и массы продукта в резервуаре;

6. расчет коэффициента теплопередачи через днище;
7. расчет коэффициента теплопередачи через стенку, контактирующую с газовым пространством резервуара;
8. расчет коэффициента теплопередачи через стенку, контактирующую с продуктом;
9. расчет коэффициента теплопередачи через кровлю резервуара;
10. определение осредненного коэффициента теплопередачи от продукта в резервуаре к окружающей среде;
11. определение температуры теплоносителя в необходимый момент производственной операции (наполнение, опорожнение, выстаивание).

Решение нестационарной задачи по определению теплового режима резервуара, зависящего от параметров окружающей среды и грунта, позволит решить большое количество прикладных задач, а именно:

- определение режимов производительности насоса при гидравлических испытаниях в зимнее время, позволяющие исключить кристаллизацию воды на поверхностях, граничащих с окружающей средой;
- определение безопасного времени хранения нефти и (или) нефтепродукта в резервуаре с целью предотвращения выпадения донного осадка, а также определение массы выпадающего парафина на стенки и днище сооружения и борьба с ними;
- определение температуры фундамента и основания под резервуаром от горячего теплоносителя и влияние оттаявшей влаги в грунте на напряженно- деформированное состояние всего резервуара с целью диагностики мест аварий сооружения;

- определение состояния воды (твердое, жидкое), растворенной в нефтепродукте (бензин, дизельное топливо), при эксплуатации резервуара в «опасный» период эксплуатации объекта (осень-зима, зима-весна);
- определение объема дизельного топлива в резервуаре с целью обнаружения переливания продукта через край резервуара;
- определение оптимальных условий окружающей среды для поддержания рабочего состояния основного клапана резервуарной задвижки приемо-раздаточного патрубка резервуара в зимнее время;
- диагностика свищей при резком перепаде температур в зимнее время и многие другие вопросы, связанные с тепловым режимом сооружения.

Решение вышеуказанных технических вопросов позволит повысить эксплуатационную надежность резервуара, безаварийность работы резервуарного парка, уменьшит финансовые затраты на решение образующихся проблем эксплуатации.

### **3.3 Тепловой режим гидравлических испытаний резервуара вертикального стального объемом 20 000 м<sup>3</sup>**

Технологический процесс перекачки нефти предполагает наличие большого объема резервуарных емкостей. Самым распространенным типом резервуаров для хранения нефтепродуктов является вертикальный стальной цилиндрический резервуар (далее - РВС). Стандарты и единые руководящие документы для нефтяных организаций рекомендуют проводить гидравлические испытания резервуаров при температуре окружающего воздуха не ниже 5°С [101]. Однако существует необходимость выполнения таких испытаний в зимнее время. При проведении гидравлических испытаний резервуаров в условиях низких температур существует опасность застывания воды в испытуемом резервуаре, как во время заполнения, так и во время последующего выстаивания. Особенно это характерно для условий Западной Сибири, где действие низких температур усиливается влиянием ветра.

Поэтому при испытаниях резервуаров при температуре ниже 0°С должна быть разработана программа испытаний, предусматривающая мероприятия по предотвращению замерзания воды в трубах, задвижках, а также обмерзания стенки резервуара [102]. Важно оценить количество тепла, которое потребуется для поддержания теплового баланса резервуара, и, если это необходимо, рассчитать мощность подогревателя.

Испытание резервуаров проводят после окончания всех работ по монтажу и контролю, перед присоединением к резервуару трубопроводов и после завершения работ по обвалованию.

Основными видами нагрузок при гидравлических испытаниях являются испытание на гидравлическое давление, обусловленное высотой налива и плотностью испытательной жидкости (для всех типов резервуаров), и избыточное давление, избыточное разрежение в газовом

пространстве (при испытании РВС).

Гидравлическое испытание следует проводить наливом воды на проектный уровень залива продукта или до уровня контрольного отверстия, которое предусмотрено для ограничения высоты наполнения резервуара. Налив воды следует осуществлять ступенями по поясам с промежутками времени, необходимыми для выдержки и проведения контрольных осмотров.

При обнаружении течи из-под края днища, появления мокрых пятен на поверхности, свищей или трещин в стенке резервуара необходимо прекратить испытание, слить воду установить и устранить причину течи.

Резервуар считается выдержавшим гидравлическое испытание, если в течение указанного времени на поверхности стенки или по краям днища не появляются течи и если уровень воды не снижается.

Рассмотрим резервуар вертикальный стальной для нефти и нефтепродуктов, объемом  $20\,000\text{ м}^3$  (типовой проект 701-1-60 РВС-20000).

Наполнение (опорожнение) резервуара РВС должно осуществляться с производительностью подачи воды не более  $500\text{ м}^3/\text{час}$  [101].

Температура подаваемой воды составляет от  $4^\circ\text{C}$  до  $40^\circ\text{C}$  [102].

Испытания резервуаров следует проводить по следующим этапам, представленным в таблице 3.2.

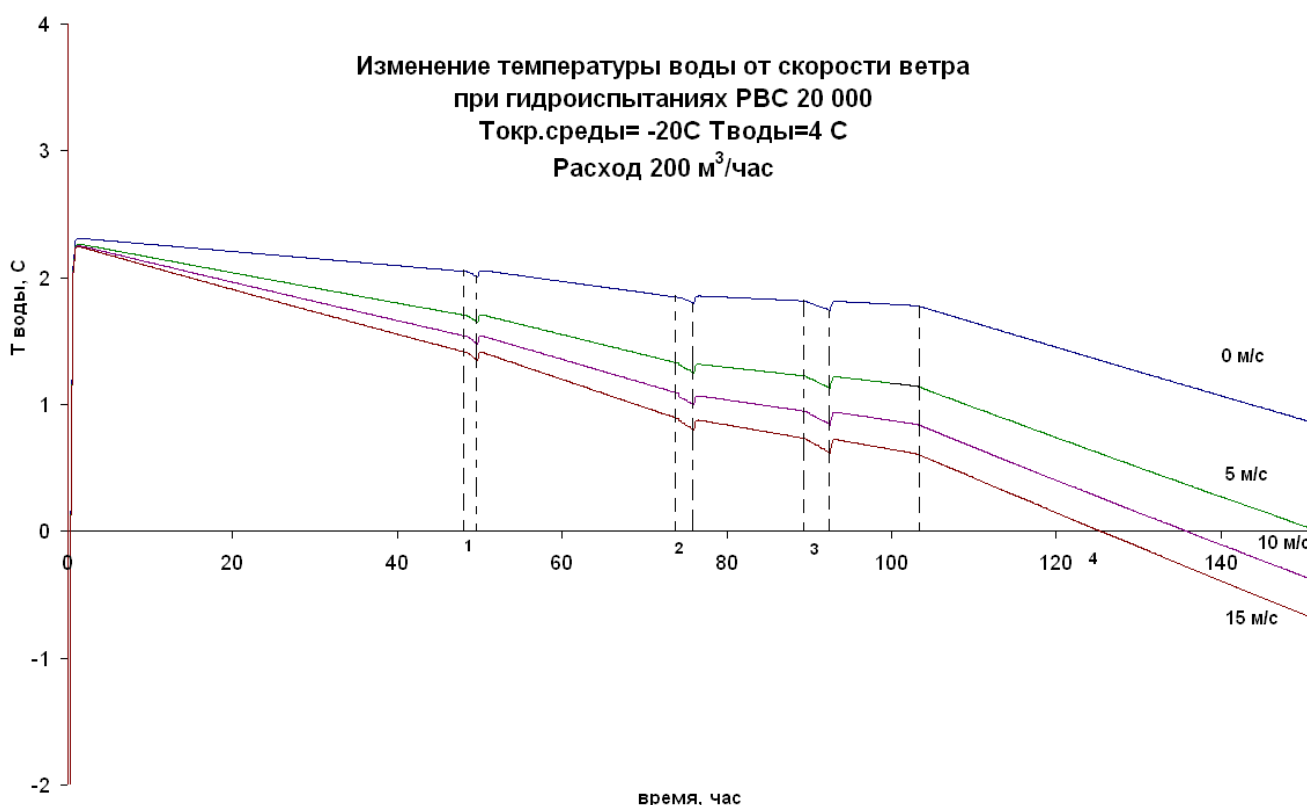
Таблица 3.2

Этапы проведения испытаний резервуаров  
(при производительности подачи воды  $500 \text{ м}^3/\text{час}$ )

№ этапа	Виды работ	Время выдержки	Время заполнения, час	Высота заполнения, м Объем воды, закачанный на данном этапе, м <sup>3</sup>
1	Заполнение резервуара на 50% от максимального испытательного уровня и осмотр	1 час	19,45	5,96/ 9728,49
2	Заполнение резервуара на 75% от максимального испытательного уровня и осмотр	2 часа	9,73	8,94/ 4864,25
3	Заполнение резервуара на 90% от максимального испытательного уровня и осмотр	3 часа	5,84	10,73/ 2921,82
4	Заполнение резервуара до максимального испытательного уровня и осмотр с выполнением замеров	$V_{рез} = 10000 \text{ м}^3$ - 24 часа; $V_{рез} > 10000 \text{ м}^3$ - 48 часов; $V_{рез} \leq 20000 \text{ м}^3$ - 72 часа	3,88	11,92/ 1942,44
ИТОГО:		54	38,9	19457
5	Опорожнение резервуара до 90% от максимального испытательного уровня, создание избыточного давления на 25% выше проектного;	30 мин		
6, 7	Опорожнение резервуара до 50%, до 10...15% от максимального уровня (осмотр);	-		
8	Полное опорожнение резервуара (осмотр, выполнение замеров)			

При назначении времени выдержки на каждом этапе испытания должна учитываться интенсивность и форма осадки основания в соответствии с требованиями СНиП 2.09.03-85\* «Сооружения промышленных предприятий».

В результате проведенных теплофизических расчетов был получен график (рисунок 3.6) изменения температуры воды при проведении гидравлических испытаний резервуара вертикального стального объемом 20000 м<sup>3</sup> в зимнее время в зависимости от скорости ветра. На рисунке 3.7 ограничены вертикальными линиями этапы выстаивания резервуара, сплошными же представлен этап закачки. Как видно из графика в зимнее время при закачки резервуара происходит постепенное охлаждение теплоносителя примерно на 1,5-2 °С [97].

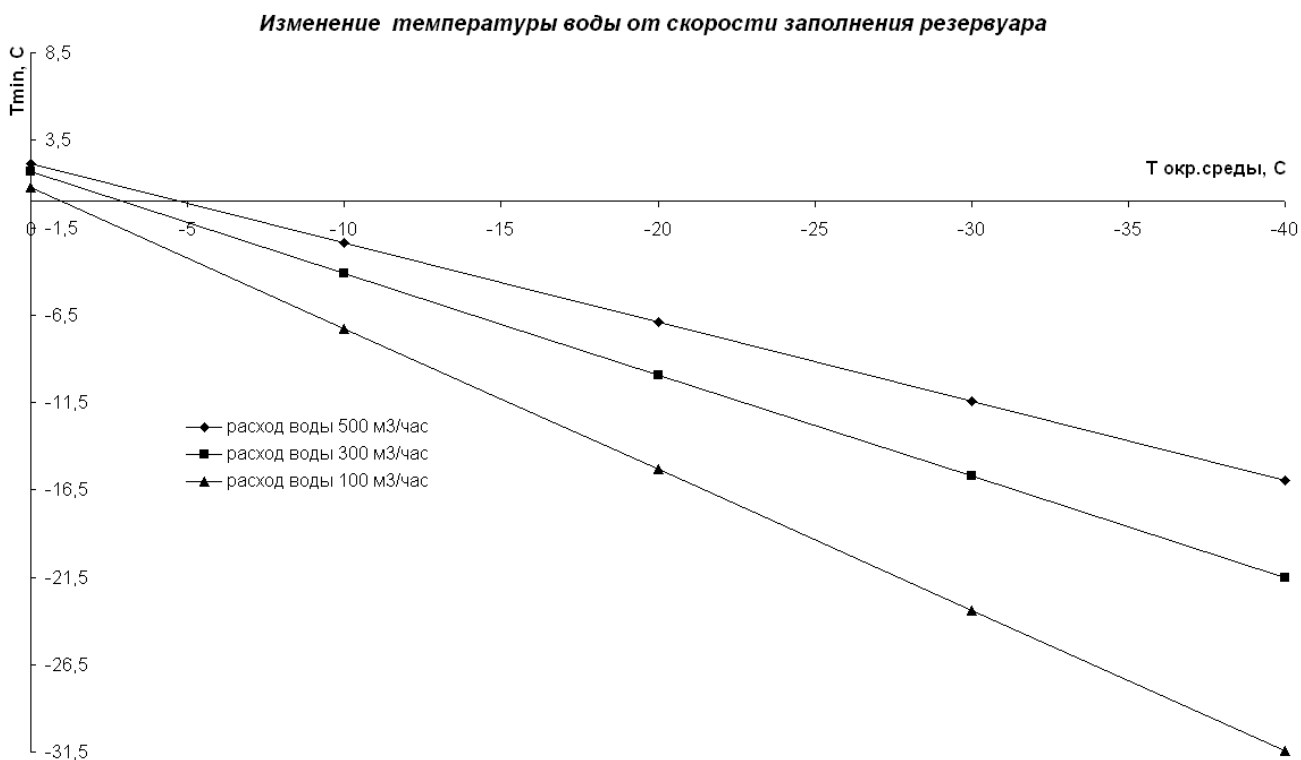


**Рисунок 3.6 - Изменение температуры воды от скорости ветра во время выстаивания и заполнения резервуара.**

**Примечание: 1,2,3,4 – периоды выстаивания воды в резервуаре.**

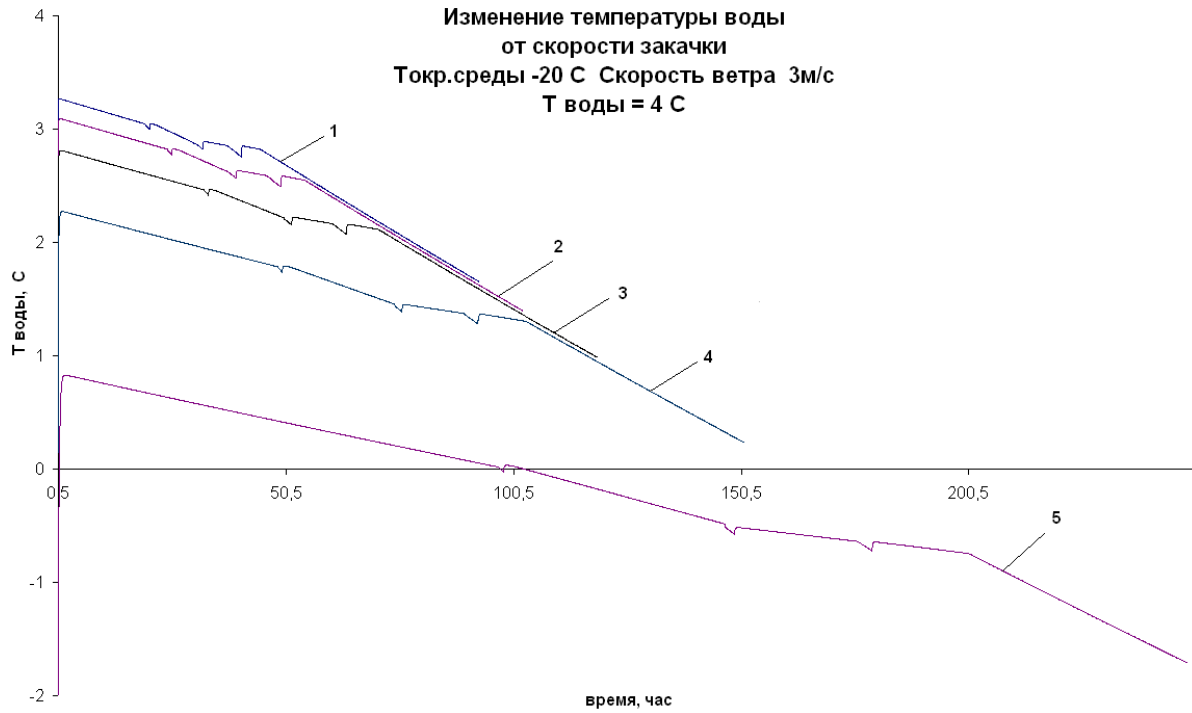


Также был построен график (рисунок 3.7), показывающий зависимость минимальной температуры воды от температуры окружающей среды для разных расходов (500, 300, 100 м<sup>3</sup>/час). Как видно из графика, чтобы избежать замораживания воды в резервуаре при расходе 500 м<sup>3</sup>/час максимальная температура окружающей среды должна быть -5°С [97].



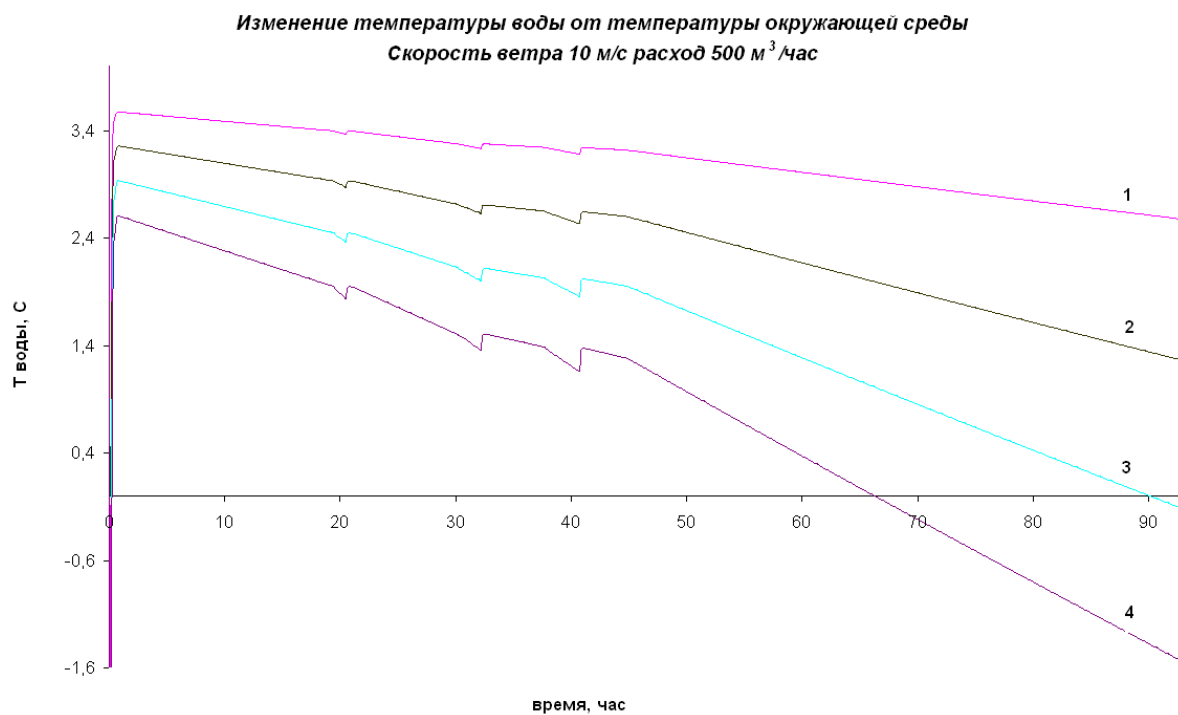
**Рисунок 3.7 - Зависимость минимальной температуры воды от температуры окружающей среды в начальный период времени.**

На основании уравнений (3.7), (3.9), (3.11) для различных условий заполнения и охлаждения резервуара построены графики (рисунок 3.8, рисунок 3.9), позволяющий определить температуру теплоносителя в конце гидравлических испытаний [97].



**Рисунок 3.8 - Изменение температуры воды в зависимости от расхода.**

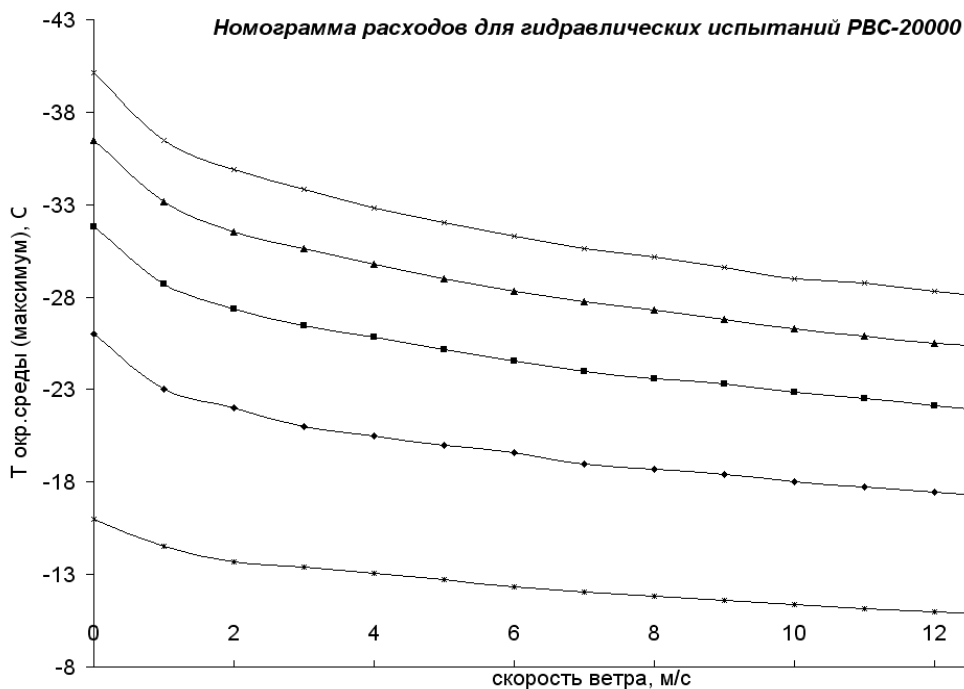
**Примечание: 1-500 м<sup>3</sup>/час, 2-400 м<sup>3</sup>/час, 3-300 м<sup>3</sup>/час, 4-200 м<sup>3</sup>/час, 5-100 м<sup>3</sup>/час**



**Рисунок 3.9 - Изменение температуры воды при гидравлических испытаниях в зависимости от температуры окружающей среды.**

**Примечание: 1-  $-10^{\circ}\text{C}$ , 2-  $-20^{\circ}\text{C}$ , 3-  $-30^{\circ}\text{C}$ , 4-  $-40^{\circ}\text{C}$ .**

При исследовании была построена номограмма рекомендованных расходов для гидравлических испытаний, область под кривой характеризуется возможными условиями среды для проведения испытаний РВС – 20 000 (рисунок 3.10) [97].



**Рисунок 3.10 - Номограмма расходов при гидравлических испытаниях РВС – 20000.**

Примечание: \* - 100 м³/час, ♦ - 200 м³/час, ■ - 300 м³/час, ▲ - 400 м³/час, x - 500 м³/час

Для построения номограмм расходов предлагаем следующие корреляционные зависимости, представленный в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Корреляционные зависимости температуры окружающей среды от скорости ветра [97]

Расход, м <sup>3</sup> /час	Зависимость температуры окружающей среды от скорости ветра
100	$T = -0.0004 \cdot g^4 + 0.0145 \cdot g^3 - 0.189 \cdot g^2 + 1.2818 \cdot g - 15.823 .$
200	$T = -0.0009 \cdot g^4 + 0.0306 \cdot g^3 - 0.3943 \cdot g^2 + 2.485 \cdot g - 25.665 .$
300	$T = -0.0008 \cdot g^4 + 0.0307 \cdot g^3 - 0.4025 \cdot g^2 + 2.6545 \cdot g - 31.47 .$
400	$T = -0.0009 \cdot g^4 + 0.0333 \cdot g^3 - 0.4368 \cdot g^2 + 2.9354 \cdot g - 36.154 .$
500	$T = -0.0009 \cdot g^4 + 0.0327 \cdot g^3 - 0.4442 \cdot g^2 + 3.1069 \cdot g - 39.771 .$

В результате проведенных теплофизических расчетов были получены следующие выводы [97]:

1. При неблагоприятных внешних условиях (низкая температура окружающей среды, большая скорость ветра) возможно понижение температуры воды ниже 0°C, что приведет к замерзанию воды и разрыву стенок резервуара. Поэтому расход воды 100 м<sup>3</sup>/час (время проведения гидроиспытаний равно 248,6 часов) не рекомендуется для проведения гидравлических испытаний резервуаров в зимнее время.

2. Самыми опасными периодами гидравлических испытаний резервуара в зимнее время, в связи с возможностью замерзания воды, являются: первая закачка воды в резервуар и последний этап выстаивания, длительность которого равна 48 часам.

3. Установлено, что температура воды при закачке первой порции не зависит от скорости ветра (так как происходит изменение значения температуры только в четвертом знаке после запятой), а определяется

температурой днища и стенок резервуара и зависит от скорости закачки. Скорость ветра вносит сильные изменения на этапе четвертого выстаивания воды в резервуаре, так как происходит длительное взаимодействие жидкости с неблагоприятной окружающей средой.

4. При заполнении пустого резервуара первая порция теплоносителя будет быстро остывать (рисунок 3.9), поэтому при проведении гидравлических испытаний в зимнее время первые порции воды могут замерзнуть. Быстрое остывание (замерзание) жидкости объясняется малой теплоемкостью днища и стенок резервуара ( $m_0c_0$ ), которые до заполнения имели температуру окружающей среды.

При дальнейшем заполнении может происходить нагревание жидкости и плавление образовавшегося льда. В этом случае, в уравнение (3.1) необходимо записать дополнительный член, который будет описывать процессы фазового перехода. Все выделившееся тепло при плавлении льда пойдет на изменение температуры теплоносителя.

### **3.4 Расчет теплообменного аппарата (змеевика) для поддержания постоянной температуры мазута в мазутохранилище на Тюменской ТЭЦ - 2**

Основным топливом для работы Тюменской ТЭЦ-2 является природный газ, мазут используют в качестве резервного топлива. Мазут находится в 4 резервуарах, расположенных на территории мазутохранилища. Мазутное хозяйство предназначено для приема, хранения и подготовки мазута (ГТТ) к сжиганию, бесперебойного снабжения подогретым и профильтрованным топочным мазутом в количестве, требуемом нагрузкой котельной, с необходимым давлением и вязкостью.

Подогрев мазута производится за счет работы мазутных ребристых подогревателей ПМР-13 120, ПМР-13 240. Подогреватели мазута типа ПМР системы ЦКТИ-ТКЗ-ИТТФ — горизонтальные, кожухотрубного типа с поверхностью нагрева из продольно-оребрённых труб — предназначены для подогрева паром высоковязкого мазута на ТЭЦ и для водогрейных котлов промышленных и районных котельных; устанавливаются на открытой площадке возле здания насосной.

В настоящее время подогреватели существенно изношены (срок эксплуатации свыше 20 лет), морально устарели, а вся система в целом является энергоёмкой и малоэффективной. Одним из вариантов увеличения надёжности и эффективности процесса и системы подогрева мазута на Тюменской ТЭЦ – 2 является реконструкция мазутохранилища с заменой подогревателей на змеевиковые ТА, расположенные внутри резервуаров.

По представленной выше методике (раздел 3.1, 3.2) [98] был произведен расчет такого змеевика. Итогом расчета стало: Площадь ТА 363,61 м<sup>2</sup>, длина ТА – 733м. Рассмотрим подробно расчет.

Объектом теплотехнического расчета стал резервуар хранения №4: цилиндрический вертикальный резервуар, выполненный по типовому проекту (№704-1-174-84) «Стальные наземные вертикальные резервуары для нефтепродуктов емкостью 20000 м<sup>3</sup>», разработанный институтом ЦНИИ проектконструкция.

Размеры резервуара: высота стенки – 17,9 м, диаметр внутренний – 39,9 м.

Стенка резервуара изготовлена из 4 карт, разбитых по высоте на 12 поясов высотой 1490 мм. Толщины стенки в представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Толщины стенки резервуара

№ пояса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Толщина, мм	16	13	12	12	12	11	11	1	11	11	10	10

Днище резервуара изготовлено из листов толщиной 6 мм, толщина окрайки днища 9 мм.

Кровля резервуара предусмотрена 24 сборных щитов (сегментов), опирающихся одним концом на стенки, а другим концом – на центральное кольцо. Толщина листов кровельных щитов составляет 4 мм.

Материал стальной конструкции согласно паспорта для листов стенки и днища из стали марки 09Г2С-12, 09Г2С-15, ВСт3Гпс-5, ВСт3сп-2, ВСт3пс-5. Для сварки применена сварочная проволока СВ-08-ГА, флюс АН-348. Для сварки щитовой кровли использована сварочная проволока Св-08Г2С, газ СО<sub>2</sub>. При монтаже стальных конструкций использованы электроды типа Э50А, марки УОНИ 13\55.

Основание резервуара запроектировано из послойно уплотненного песчаного основания с бетонным кольцом под стенкой резервуара.



Антикоррозийная защита металлоконструкций с наружной стороны предусмотрена лакокрасочным покрытием из лака №170 с алюминиевой пудрой.

Циркуляционное перемешивание в резервуарах мазутного склада производится мазутом с  $T$  90-130 °С. Максимальная  $T$  мазута в резервуарах должна быть на 15 °С ниже  $T$  вспышки топлива но не выше 90°С.

Подогрев мазута в резервуаре производится при снижении температуры мазута до  $T_m=45$  °С.

Для быстроты и удобства расчета был создан программный комплекс. Согласно созданной программы был определен оптимальный расход равный 0,843 кг/с при температуре воздуха -40 °С и ветре 4 м/с.

Для определения поверхности нагрева теплообменного аппарата было использовано уравнение теплового баланса в виде [104]

$$Q = G_1 \cdot C_{pm_1} \cdot \Delta t = \eta \cdot G_2 \cdot C_{pm_2} \cdot \Delta \tau = k_T \cdot H \cdot \theta_T, \quad (3.35)$$

где  $G_1$  - расход пара на подогрев мазута, [кг/с];  $m$  - масса мазута, кг ( $m = 7250000$  кг);  $C_{pm_1}$ ,  $C_{pm_2}$  - теплоемкости мазута и пара,  $\frac{Дж}{(кг \cdot ^\circ C)}$ ;

$H$  - поверхность теплообменного аппарата,  $м^2$ ;  $k_T$  - полный коэффициент теплопередачи от теплоносителя к мазуту,  $\frac{Вт}{(м^2 \cdot ^\circ C)}$ ;

$\theta_T$  - среднелогарифмический температурный напор.

Для правильного подсчета количества тепла, необходимого для подогрева определенного количества нефтепродукта в резервуаре от начальной температуры до конечной в зависимости от температуры окружающей среды и др., надо определить суммарные составляющие тепловых потоков. В общем случае полное количество тепла  $Q$ , сообщаемое теплообменным аппаратом, складывается из следующих элементов [105]:

1.  $q_1$  - тепло, необходимое для разогрева количества нефтепродукта массой  $m$  от  $t_n$  до  $t_k$ , имеющего теплоемкость  $C_{pm}$

$$q_1 = m \cdot C_{pm} \cdot (t_k - t_n) \quad (3.36)$$

$$t_n = 65^\circ\text{C}; \quad t_k = 70^\circ\text{C}.$$

2.  $q_3$  - тепловые потери в окружающую среду

$$q_3 = k \cdot F \cdot \tau \cdot (t_{cp} - t_{\text{возд}}), \quad (3.37)$$

где  $k$  - полный коэффициент передачи тепла от мазута в окружающую среду (через днище, стенки, кровлю) был рассчитан по вышеуказанной методике.

Характеристика мазута при средней температуре мазута и температуре стенки представлены таблице 3.4.

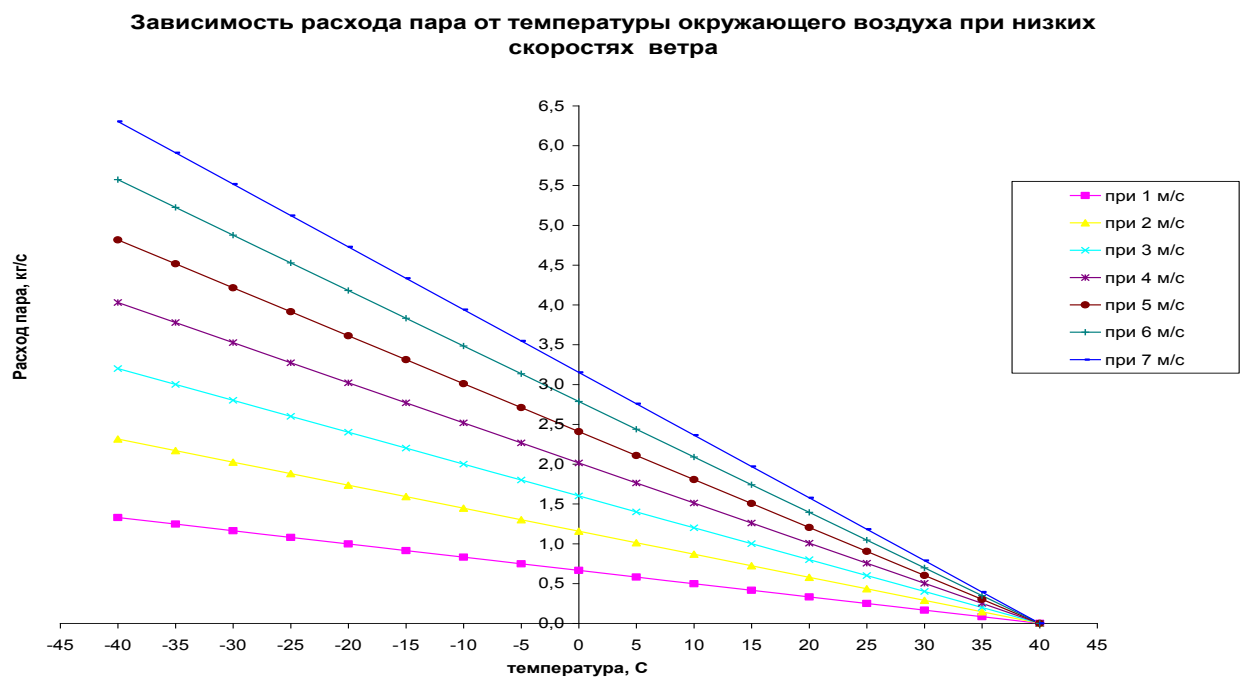
Таблица 3.4.

Характеристики мазута  
при средней температуре мазута и температуре стенки [35]

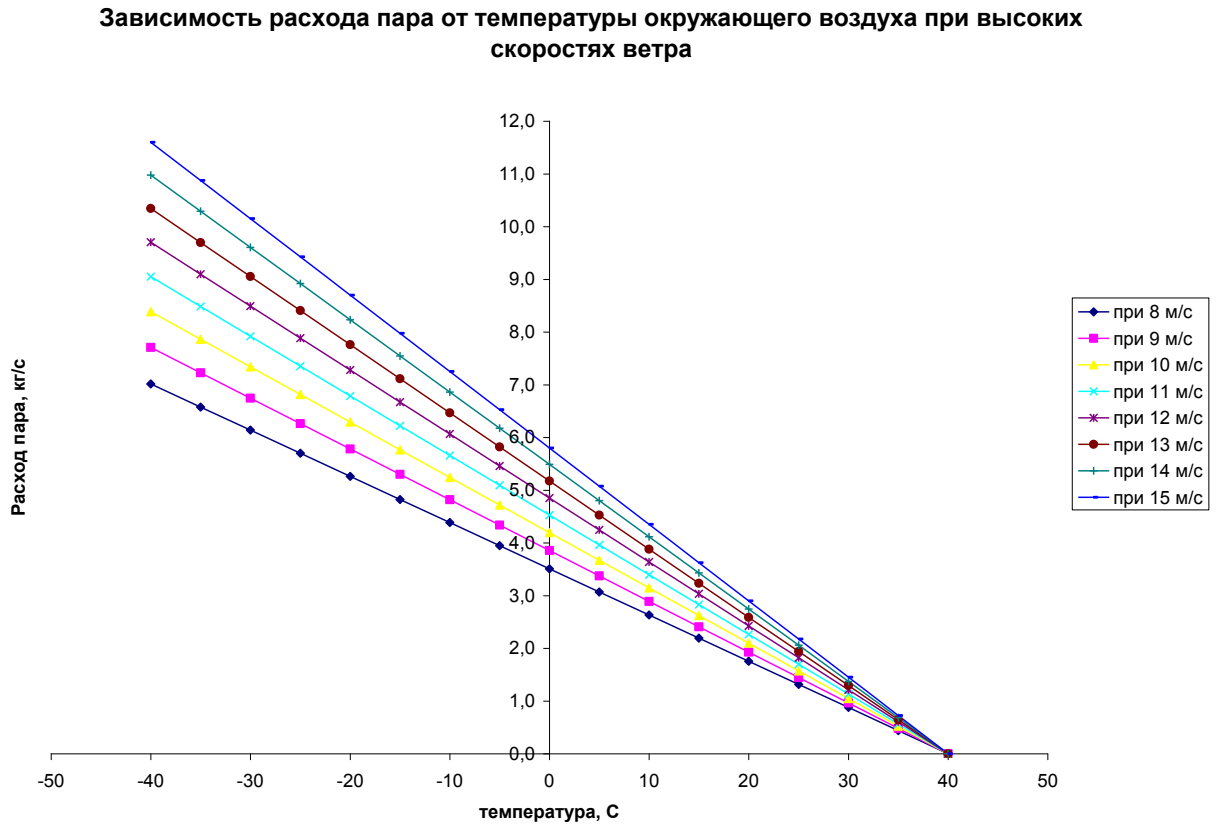
Для 313К	Для 308К
$C_p = 1860 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	$C_p = 1842 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$
$\rho = 948 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\rho = 951 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
$\lambda = 0,1194 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\lambda = 0,1197 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
$\nu = 650 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\nu = 980 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$

Данные получены интерполяцией.

Для успешной и продуктивной работы теплообменного аппарата и системы подогрева мазута были построены ряд номограмм, которые показывают зависимость расхода пара от температуры окружающего воздуха при различных скоростях ветра (рисунки 3.11, 3.12) [95]



**Рисунок 3.11 - Зависимость расхода пара от температуры окружающего воздуха при низких скоростях ветра**



**Рисунок 3.12 - Зависимость расхода пара от температуры окружающего воздуха при высоких скоростях ветра**

Также была построена номограмма (рисунок 3.13), показывающая распределение температуры по времени внутри теплоизоляции резервуара. По построенному графику  $\theta = f(Bi, Fo)$  очень удобно на стадии проектирования определить время охлаждения резервуара и его температуру в последующий момент времени при данной температуре окружающего воздуха, когда определены начальная температура на поверхности резервуара и температура продукта, содержавшегося в нем. Для этого на графике надо определить нужный  $Bi$  при пересечении считанных  $Fo$  и  $\theta$ , определенный  $Bi$  (линия) и является линией характеризующей проектируемый ТА.

Для того чтобы тепло сохранить внутри резервуара можно использовать теплоизоляцию. Если рассмотреть ситуацию, что резервуар теплоизолирован, то тогда в связи с тем, что толщина теплоизоляции мала по сравнению с диаметром резервуара, теплоизоляцию нужно рассматривать как пластину толщиной  $\delta$ .

Пусть охлаждение резервуара происходит при постоянной температуре окружающего воздуха  $t_{\text{воздуха}} = \text{const}$ . Будем считать, что отвод тепла осуществляется при одинаковом коэффициенте теплоотдачи ( $\alpha = \text{const}$ ) во всем промежутке времени. Отсчет температуры пластины для любого времени будем вести от температуры окружающей среды, то есть  $(t - t_{\text{воздуха}}) = \nu$ . Уравнение теплопроводности в нашем случае принимает вид:

$$\frac{d\nu}{d\tau} = a \cdot \left( \frac{d^2\nu}{dx^2} \right). \quad (3.38)$$

Начальные условия:

при  $\tau = 0$   $\nu = \nu_0 = t_0 - t_{\text{воздуха}}$ .

Начало координат в отличие от классической постановки задачи удобно поместить на поверхности пластины, контактирующей с мазутом. При этом начальные условия пластины запишутся:

$$\text{а) на поверхности пластины при } x = 0 \quad \left( \frac{dv}{dn} \right)_{n=0} = 0;$$

$$\text{б) на поверхности пластины при } x = \delta \quad \left( \frac{dv}{dn} \right)_{x=\delta} = -\frac{\alpha}{\lambda} \cdot v_{x=\delta}$$

Полученное дифференциальное уравнение  $\frac{dv}{d\tau} = a \cdot \left( \frac{d^2v}{dx^2} \right)$  совместно с начальными и граничными условиями однозначно формирует поставленную задачу. Решение дифференциального уравнения с учетом начальных и граничных условий дает искомую зависимость распределения температуры в плоской стене. При заданном числе  $Bi$  безразмерная температура лишь зависит от времени, что позволяет решить задачу графически.

Примерная температура определяется

$$\theta = \frac{(t_{mek} - t_{воздуха})}{(t_0 - t_{воздуха})}, \quad (3.39)$$

где  $t_{mek}$  - температура мазута (текущая) спустя время  $\tau$ , °С;

$t_0$  - начальная температура мазута, °С;

$t_{воздуха}$  - температура окружающего воздуха, °С.

При охлаждении пластины теплоизоляционного материала, а затем и мазута в резервуаре для каждого последующего момента времени будет своя кривая, монотонно убывающая к поверхностям пластины.

Задаваясь температурой на поверхности резервуара получены прямые  $Bi$  для теплоизоляции.

Последовательность построения графика  $\theta = f(Bi, Fo)$  следующая:

1. определить  $Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta T}{\nu^2}$  при отсутствии ветра;
2. при наличии ветра определить  $Re = \frac{\rho_{ветра} \cdot l}{\nu}$ ;
3. определить  $Nu$  (см. алгоритм программы);
4. определить  $\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}$ ;
5. по формуле  $d_{кр} = \frac{2 \cdot \lambda}{\alpha}$  проверяем на условие  $d > d_{кр}$ ;
6. по формуле находим  $Bi = \frac{\alpha \cdot l_{теплоизоляции}}{\lambda_{теплоизоляции}}$ ;
7. по формуле находим число Фурье  $Fo = \frac{a \cdot \tau}{l_{теплоизоляции}^2}$ ,

где  $a$  - температуропроводность, определяется по формуле  $a = \frac{\alpha}{c \cdot \rho}$

8. по формуле определить  $\theta = \frac{(t_{тек} - t_{воздуха})}{(t_0 - t_{воздуха})}$ .

Для каждого момента времени соответствующие  $Fo$  и  $\theta$ , при этом определены точки с одинаковым  $\alpha$ , что и является основанием для определения  $Bi$ . Полученные результаты наносятся на график, где по оси абсцисс  $Fo$ , по оси ординат  $\theta$ .



**Рисунок 3.13 - Распределение температуры внутри теплоизоляции резервуара**



### **Выводы по главе III.**

1. Уравнение теплового баланса для решения задач теплопереноса через любые конструкции является основным уравнением в математической модели теплового состояния этих конструкций (в качестве примера – резервуара).

2. На основании уравнения теплового баланса выведены уравнения, которые позволяют в зависимости от режима эксплуатации резервуара любого объема, определять изменение температуры теплоносителя от таких параметров как скорость ветра, производительность насоса, время заполнения и хранения и др.

3. Представленная методика определения коэффициента теплопередачи и алгоритм расчета температуры теплоносителя позволяет оценивать тепловые потери через ограждающую конструкцию резервуара.

4. Выведенные формулы и методика может применяться для решения производственных задач, таких как определение режимов производительности насоса при гидравлических испытаниях в зимнее время, позволяющие исключить кристаллизацию воды на поверхностях, граничащих с окружающей, определение безопасного времени хранения нефти и (или) нефтепродукта в резервуаре с целью предотвращения выпадения донного осадка, а также определение массы выпадающего парафина на стенки и днище сооружения и борьба с ними и др.

Решение вышеуказанных технических вопросов позволит повысить эксплуатационную надежность резервуара, безаварийность работы резервуарного парка, уменьшит финансовые затраты на решение образующихся проблем эксплуатации.

5. Математическая модель теплового состояния резервуара представляет собой полную систему дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса для хранимой жидкости, газовой смеси над ней, уравнений теплопередачи тепла через ограждающую конструкцию резервуара и уравнений тепломассообмена в окружающей среде. Решение этой задачи с учетом всех влияющих факторов представляет собой значительные трудности.

## ГЛАВА IV. АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В РЕЗЕРВУАРЕ

### 4.1 Задача Стефана

Для математического описания процесса нестационарной теплопроводности в грунте используют уравнение теплопроводности Фурье, дополненное соответствующими начальными и граничными условиями. Для случая одномерного температурного поля оно имеет вид [103]:

$$\rho C_{об}(z) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(z) \frac{\partial T}{\partial z} + f(z) \right),$$

где  $f(z)$  - плотность распределенных источников или стоков тепла;  $C_{об}(z)$  — коэффициент теплоемкости среды.

В случае постоянных теплофизических характеристик и при отсутствии источников тепла можно написать:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2},$$

где  $a = \lambda / \rho C_{об}$  — коэффициент температуропроводности.

При изменении агрегатного состояния грунтовой воды теплофизические характеристики грунта изменяются скачкообразно и при фазовых переходах происходит выделение или поглощение теплоты.

Наиболее простой является постановка задачи промерзания (протаивания) грунтов с образованием фазовой границы, т.е. границы, на которой поддерживается температура фазовых переходов для данного грунта, тогда на ней же скачком будут изменяться и теплофизические свойства грунта. В некоторых случаях решения задач о движении границы промерзания - протаивания в грунте получают методом Стефана. Следует отметить, что данный метод имеет достаточно ограниченный круг применения. В модели Стефана для того, чтобы вычислить глубину

промерзания как функцию времени, предполагается, что изменение температуры от поверхности к фронту промерзания линейно и что температура остается постоянной ниже линии фронта промерзания [105]. Из-за упрощений в формуле Стефана и того, что объемной массовой теплоемкостью грунта пренебрегают, обычно глубина промерзания, вычисленная по этой модели, завышается. Некоторые недостатки формулы Стефана были устранены Лейбензоном. Формула Лейбензона учитывает распределение температур в талой зоне перед началом ее промерзания или протаивания. В последующем важную роль в решении задач о промерзании грунтов сыграли работы В.А. Кудрявцева и В.Г. Меламеда [105].

В работе [16] для прогноза температурного режима вечномерзлого грунта использовался метод конечных разностей, который реализован компьютерной программой «WARM», разработанной на кафедре геокриологии геологического факультета МГУ. В работе [17] дискретная постановка задачи Стефана была получена с помощью интегро-интерполяционного метода, реализованного с помощью алгоритма Томаса.

Одновременно развивались приближенные методы решения задачи Стефана. Существенный вклад в это направление внесли: М.М. Крылов, В.С. Ковнер, В.С. Лукьянов, Г.В. Порхаев, И.А. Золотарь, Г.М. Фельдман и др. В.А. Кудрявцев предложил приближенные формулы расчета глубин сезонного и многолетнего промерзания при периодических колебаниях температуры на поверхности грунтов. На основании принципа квазистационарности температурных полей в промерзающем массиве грунта было получено множество решений, учитывающих теплоизолирующее влияние различных покровов.

Отметим решение плоской задачи оттаивания вечномерзлых грунтов, полученное С.В. Томирдиаро [1]. Модель с энтальпийным подходом была предложена Дюзенбером и Эйресом в 1962 году, а

Н.А. Бучко предложила физическую модель, учитывающую фазовые переходы незамерзшей воды в диапазоне отрицательных температур [73].

## 4.2 Двумерная задача Стефана (Stefan) в цилиндрических координатах $r, x$ в классической постановке без учета конвекции

Система уравнений для задачи о протаивании грунта (двумерной задачи Стефана в цилиндрических координатах  $r, x$  в классической постановке без учета конвекции) имеет вид [108, 109]:

$$\frac{\partial T_{1,2}}{\partial t} = a_{1,2} \left( \frac{\partial^2 T_{1,2}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{1,2}}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{1,2}}{\partial x^2} \right), \quad (4.1)$$

где индексы 1 и 2 относятся к талой и мерзлой зонам соответственно. Эти зоны разделены движущейся поверхностью (фронтом плавления)  $F(r, x, t) = 0$ . Начальным условием является отсутствие талой зоны и равенство температуры во всей области начальному значению  $T_0$  (в данном случае  $T_0 = -9^\circ\text{C}$ ). Граничные условия на неподвижных границах имеют вид:

$$\begin{aligned} T_{1,2}(x=0, r > R) &= T_0; \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0, r < R} &= q = \frac{W}{\pi R^2}, \quad \frac{\partial T_{1,2}}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \\ T_2(r \rightarrow \infty, x \rightarrow \infty) &\rightarrow T_0, \end{aligned}$$

где  $R$  - радиус резервуара,  $W$  - мощность нагревателя (в нашей модели  $R = 12\text{см}$ ,  $W = 500\text{Вт}$ ).

На фронте плавления задано равенство температур  $T_1 = T_2 = 0^\circ\text{C}$ , а также условие баланса энергии, которое часто называют условием Стефана:

$$\left( \lambda_1 |\text{grad} T_1| - \lambda_2 |\text{grad} T_2| \right) \Big|_{F=0} = L \frac{\partial F / \partial t}{|\text{grad} F|}, \quad (4.2)$$

где  $\lambda_{1,2}$  - коэффициенты теплопроводности в талой и мерзлой зонах,  $L$  - объемная теплота плавления ( $\text{Дж}/\text{м}^3$ ).

Точного аналитического решения данная задача не имеет, однако известны приближенные квазистационарные решения ряда близких задач, опубликованные в статьях [108, 109].

Следуя методике, изложенной в этих работах, будем искать

решение уравнения (4.1) в виде  $T(F)$ , где  $F = \text{const}$  - уравнение изотермической поверхности; в частности,  $F = 0$  - уравнение нулевой изотермы. Функцию  $F$  будем искать в виде:

$$F = x - f(r) - \int_0^t g(t) dt, \quad (4.3)$$

где  $f(r)$  и  $g(t)$  - неизвестные заранее функции.

Дифференцируя  $T(F)$  по  $r$ ,  $x$ ,  $t$ , находим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial r} &= -T' \cdot f', \\ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} &= f'^2 \cdot T'' - T' \cdot f'', \\ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} &= T'', \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= -g \cdot T', \end{aligned} \quad (4.4)$$

где  $T' = \frac{dT}{dF}$ ,  $T'' = \frac{d^2T}{dF^2}$ ,  $f' = \frac{df}{dr}$ ,  $f'' = \frac{d^2f}{dr^2}$ .

Подставляя (4.4) в (4.1) и пренебрегая различием между  $a_1$  и  $a_2$  (т.е. считаем  $a_1 \approx a_2 = a$ ), получаем обыкновенное дифференциальное уравнение относительно функции  $f(r)$ :

$$P(1 + f'^2) - f'' - \frac{1}{r} f' + \frac{g}{a} = 0, \quad (4.5)$$

где

$$P = T''/T'. \quad (4.6)$$

Для уравнения (4.5) может быть получено аналитическое решение, если считать величины  $g$  и  $P$  константами. Однако после того, как поле температур найдено, при его подстановке в условие Стефана (4.2) будем считать  $g$  и  $P$  функциями, что позволит найти скорость движения фронта. Физически это означает, что фронт плавления движется настолько медленно, что можно считать температурное поле мало отличающимся от стационарного (квазистационарное приближение).

Вводя обозначения

$$P = B^2,$$

$$B^2 + g/a = A^2,$$

$$y = ABr,$$

$$f' = -w'(y)/(B^2 w(y)),$$

преобразуем уравнение (4.5) к виду:

$$w'' + \frac{1}{y} w' + w = 0, \quad (4.7)$$

решением которого, как известно, является функция Бесселя первого рода нулевого порядка  $J_0(y)$ . Возвращаясь к прежним обозначениям, получаем решение для функции  $f(r)$ :

$$f(r) = -\frac{1}{B^2} \left\{ \ln \frac{273 + T_1(r)}{273} + \ln [J_0(ABr)] \right\}, \quad (4.8)$$

где  $T_1(r)$  - температура на поверхности грунта.

Очевидно, полученное решение имеет смысл, если

$$ABr < 2.4, \quad (4.9)$$

где 2.4 - первый нуль функции Бесселя  $J_0$ . Отсюда, полагая  $ABR = 2.4$ , находим:

$$g = a \left( \frac{2.4}{BR} \right)^2 - aB^2. \quad (4.10)$$

С другой стороны, интегрируя (4.6), находим:

$$T' = PT_1 e^{PF},$$

$$T = T_1 e^{PF} + T_0. \quad (4.11)$$

Подставляя в условие (4.2), получаем второе соотношение между  $g$  и  $P = B^2$ :

$$g = \frac{B^2 T_1 |\lambda_1 - \lambda_2|}{L}. \quad (4.12)$$

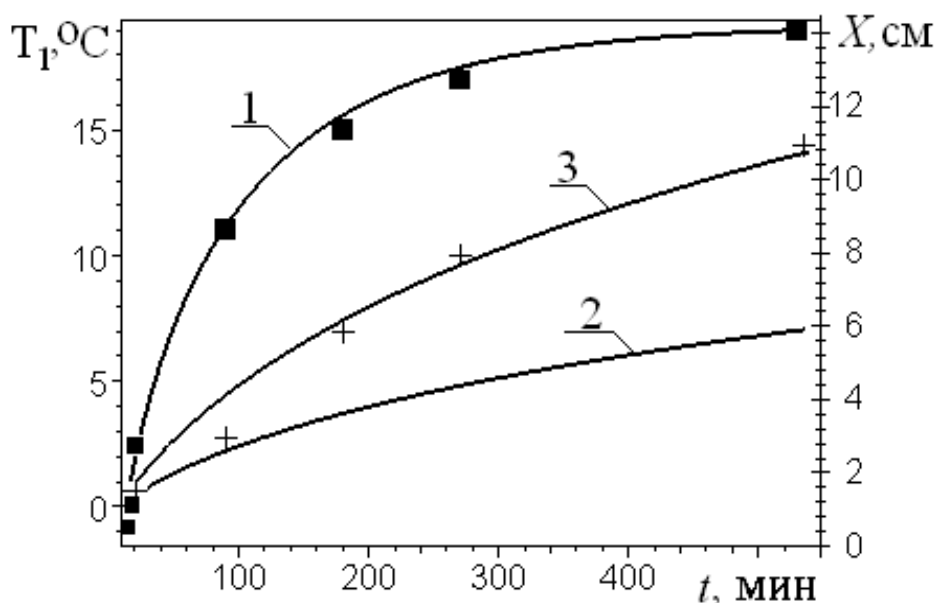


Исключая  $B^2$  из (4.10) и (4.12), получаем соотношение между  $g$  и  $T_1$ :

$$g = \frac{2.4}{R} \sqrt{\frac{a(T_1|\lambda_1 - \lambda_2|)^2}{L(T_1|\lambda_1 - \lambda_2| + aL)}}. \quad (4.13)$$

Экспериментальная зависимость температуры поверхности грунта в точке  $r = 0$  от времени приведена на рисунке 4.1 (кривая 1 аппроксимирует экспериментальные точки).

На рисунке 4.1 приведена расчетная кривая 2, полученная в результате численного интегрирования функции  $g(T_1(t))$ . Как видно из рисунка, совпадение с экспериментальными точками (обозначены символами +) наблюдается только для начала прогрева, когда перенос тепла талой водой пренебрежимо мал [90, 91].



**Рисунок 4.1 – Экспериментальная зависимость температуры поверхности грунта.**

**Примечание:** 1 - температура поверхности грунта, 2 - координата центра фронта протаивания без учета конвективного переноса тепла, 3 - то же с учетом конвективного теплопереноса, + - экспериментальные точки.

### 4.3 Двумерная задача Стефана (Stefan) в цилиндрических координатах $r, x$ в классической постановке с учетом конвекции

Запишем уравнение теплопроводности с учетом конвективного переноса тепла; при этом будем считать, что существенным является конвективный перенос только по оси  $x$ , а перенос по оси  $r$  пренебрежимо мал:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v(r, t) \frac{\partial T}{\partial x} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right). \quad (4.14)$$

Как и выше, будем искать решение в виде  $T(F)$ , а функцию  $F$  будем искать в виде:

$$F = x - f(r) - h(r) \int_0^t g(t) dt = x - f(r) - h(r) \cdot z(t), \quad (4.15)$$

$$v(r, t) = g(t) \cdot h(r),$$

где функцию  $f(r)$  будем считать известной из предыдущего решения для неподвижной среды, а безразмерную функцию  $h(r)$  – неизвестной.

Дифференцируя  $T(F)$  по  $r, x, t$ , и подставляя в (4.14), получаем дифференциальное уравнение для функции  $h(r)$ :

$$B^2 [1 + (f' + h'z)^2] - (f'' + h''z) - \frac{1}{r} (f' + h'z) = 0, \quad (4.16)$$

где  $B^2$ , как и выше, определяется формулой (4.6).

Выполняя замену  $y = B^2 \cdot r$ ,

$$f' + h'z = -u' / (B^2 u), \quad (4.17)$$

получаем уравнение для функции  $u$ :

$$\frac{d^2 u}{dy^2} + \frac{1}{y} \frac{du}{dy} + u = 0, \quad (4.18)$$

совпадающее по форме с уравнением (4.8). Решением этого уравнения является функция Бесселя (Bessel)

$$u = J_0(y) = J_0(B^2 r),$$

$$\text{а } u' = -B^2 \cdot J_1(B^2 r).$$

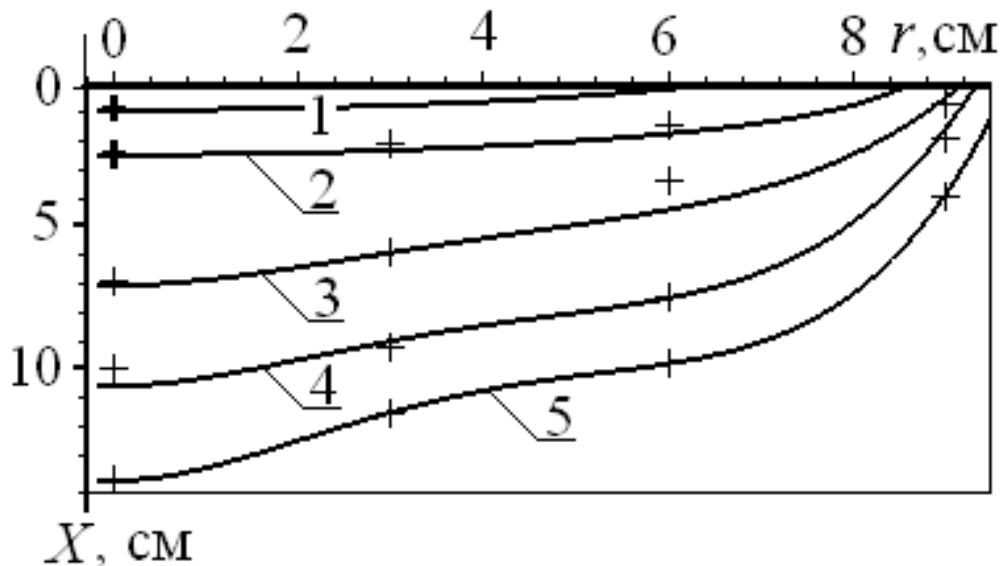
Из уравнения (4.17) находим:

$$h'(r) = -\frac{1}{z} \left( \frac{u'}{B^2 u} + f' \right) = \frac{1}{z} \left( \frac{J_1(B^2 r)}{J_0(B^2 r)} - \frac{AJ_1(ABr)}{BJ_0(ABr)} \right). \quad (4.19)$$

Интегрируя по  $r$  в области положительных значений правой части уравнения (4.19), получаем:

$$h(r) = \frac{1}{zB^2} \left[ h_0 - \ln \frac{J_0(B^2 r)}{J_0(ABr)} \right]. \quad (4.20)$$

Константа интегрирования  $h_0$  должна быть выбрана так, чтобы ликвидировать разницу между расчетными и экспериментальными значениями  $z(t)$ . Результат расчетов представлен на рисунке 4.2 в виде функции  $F(r, x, t) = 0$  в различные моменты времени  $t$ , а также на рисунке 4.1 в виде зависимости координаты центра фронта от времени (кривая 3). Видно, что учет конвективного переноса тепла позволяет достичь удовлетворительного согласия с экспериментальными данными [90, 91].



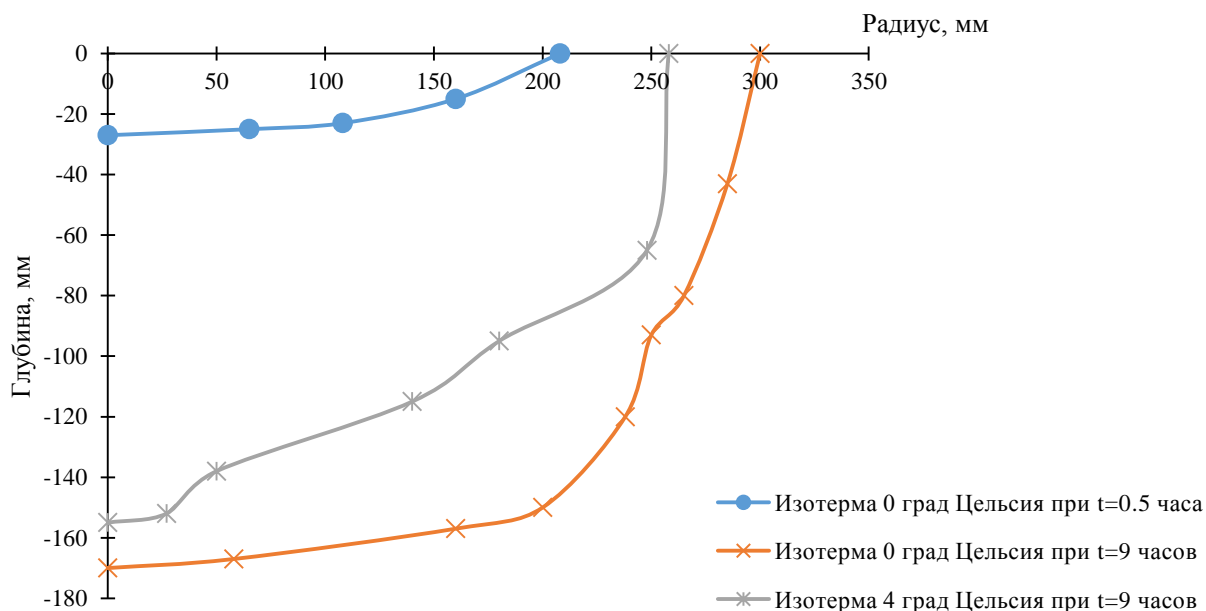
**Рисунок 4.2 - Положение и форма фронта протаивания с учетом конвективного теплопереноса.**

**Примечание: 1 -  $t = 10$  мин., 2 -  $t = 90$  мин., 3 -  $t = 180$  мин., 4 -  $t = 270$  мин., 5 -  $t = 540$  мин.**

Как видно из рисунка 4.3, расстояние между изотермами 0°C и +4°C вблизи оси  $r = 0$  равно  $\Delta z \approx 2$  см. Именно в этой области, с учетом отрицательного значения коэффициента объемного расширения воды  $\beta_T \approx -6.4 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ , возможно возникновение конвекции при нагреве сверху. Обозначив через перепад температур  $\Delta T = 4\text{K}$ , оценим число Рэлея:

$$Ra = \frac{\beta_T \Delta T g_0 (\Delta z)^3}{\nu a} > 10^5.$$

Полученная оценка на 2 порядка превышает пороговое значение  $10^3$ , при котором возникают конвективные потоки, что является еще одним подтверждением возможности данного эффекта [90, 91].



**Рисунок 4.3 - Ороение оттаивания мерзлого грунта под горячим резервуаром**

Оценивая из данных таблицы 4.1 по формуле (4.15) значение средней проекции скорости талой воды на вертикальную ось  $r = 0$ , находим в конце прогрева  $v \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$ , откуда число Пекле

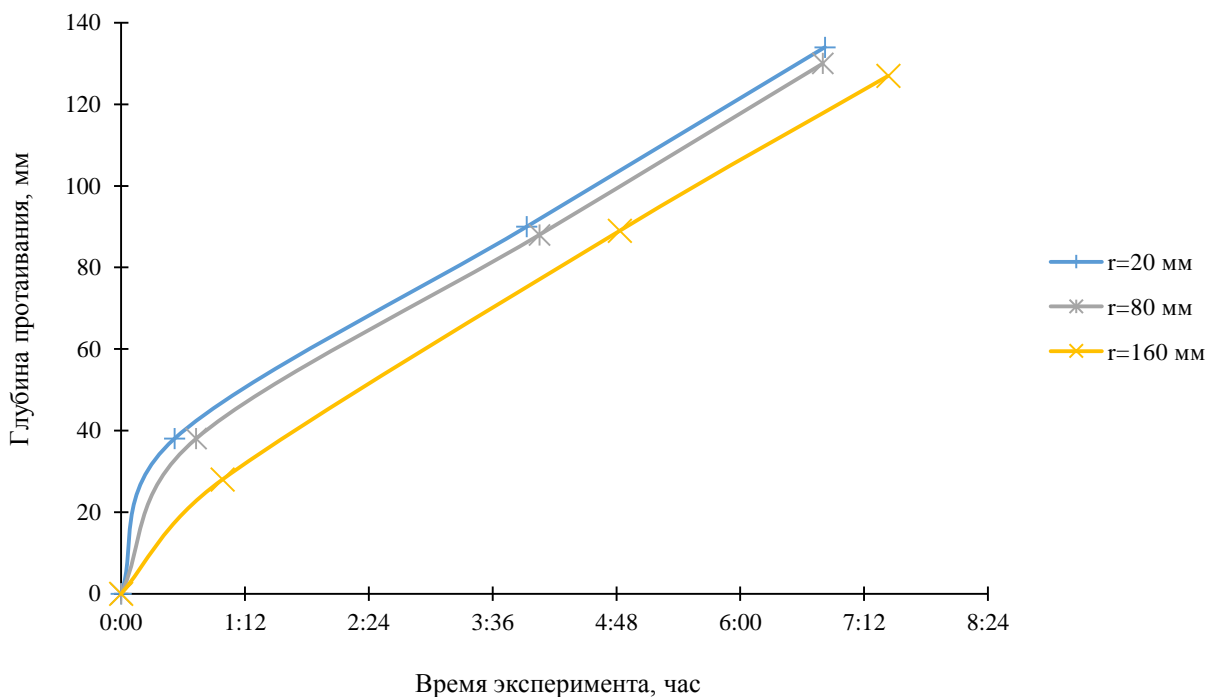
$$Pe = \frac{v \Delta z}{a} = 0.6.$$

Это означает, что конвективный перенос тепла, хотя и не является определяющим, но дает заметный (~30...40%) вклад в скорость протаивания [90, 91].

## Экспериментальные и расчетные параметры процесса прогрева

Текущее время с начала прогрева $t$ , часов	Интервал времени $\Delta t$ , час	Экспериментальное значение $z$ , см	Экспериментальное значение $g = \Delta z / \Delta t$ , м/с	Экспериментальное значение $R$ , см	Расчетное значение $B_2$ , 1/м	Расчетное значение $g$ , м/с	Расчетное значение $z$ , см
0.5	0.5	$3.0 \pm 0.3$	$(1.7 \pm 0.2) \cdot 10^{-5}$	$7.5 \pm 1$	25.55	$1.9 \cdot 10^{-5}$	3.4
4.0	3.5	$8.8 \pm 0.5$	$(4.6 \pm 0.4) \cdot 10^{-6}$	$18.0 \pm 2$	12.09	$3.4 \cdot 10^{-6}$	7.7
7.5	3.5	$12.3 \pm 0.7$	$(2.8 \pm 0.3) \cdot 10^{-6}$	$24.0 \pm 3$	9.31	$1.9 \cdot 10^{-6}$	10.1
9.0	2.5	$16.6 \pm 0.9$	$(4.8 \pm 0.5) \cdot 10^{-6}$	$29.0 \pm 3$	7.71	$1.5 \cdot 10^{-6}$	11.5

На графике 4.4 приведена зависимость движения фронта протаивания в мерзлом грунте при различном радиусе



**Рисунок 4.4 - Движение фронта протаивания в мерзлом грунте при различном радиусе**

**Вывод по главе IV.**

1. Результаты приближенного решения двумерной задачи Стефана о протаивании мерзлого грунта с учетом конвективного переноса тепла находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными [90, 91].

2. Оценка числа Рэлея подтверждает возможность возникновения конвективных потоков в талой зоне [90, 91].

3. Оценка числа Пекле согласуется с экспериментально найденным увеличением скорости движения фронта протаивания [90, 91].

## ГЛАВА V. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОМАССОБМЕННОГО ПРОЦЕССА В СИСТЕМЕ «РЕЗЕРВУАР – ОСНОВАНИЕ- ГРУНТ»

Большинство современных моделей тепломассопереноса [48, 110, 111] в многолетнемерзлых грунтах не учитывают все значимые факторы, а именно наличие ветра, солнечной радиации, режимы работы инженерной конструкции, многослойность фундамента, свойства мерзлой породы в основании.

Численным моделированием процесса промерзания, протаивания влажного грунта занимались Harlan (1973) [112], Guymon и Luthin (1974) [113], Jame (1977) [104]. Они моделировали процесс замораживания - размораживания грунта, используя численное решение уравнений тепломассопереноса, как правило, для одномерного случая, с использованием метода конечных разностей на расчетной сетке высокого разрешения и шага по времени всего в несколько секунд.

Одной из первых попыток численно решить задачу о промерзании - оттаивании грунтов является работа Nakano и Brown (1971) [114]. Авторы данной работы приняли условие на движущейся границе фронта промерзания, применив аналитическое решение, полученное Карслоу и Егером (1959) к грунту известной пористости.

Guymon и Luthin (1974) [113] описывают одномерную модель для процессов промерзания – оттаивания в грунтах, в которой миграция влаги описывается модификацией уравнения Ричардсона.

Существуют огромное количество готовых 3-D моделей, рассматривающих тепловое взаимодействие конструкций с мерзлым грунтом, но в каждой из этих моделей расчет считается без взаимного теплового влияния грунта и конструкции. Также пренебрегают конвективный перенос тепла, связанный с миграцией поровой влаги.

В связи с этим актуальными является задача решения системы уравнений тепломассопереноса в системе «инженерная конструкция – основание» с учетом основных значимых факторов.



## 5.1 Физико-математическая модель системы «резервуар – основание – мерзлый грунт»

Модель взаимодействия конструкции с многолетнемерзлым грунтом представляет собой сложную систему нелинейных дифференциальных уравнений теплофизики.

Компьютерное моделирование основано на численном решении системы уравнений, состоящей из уравнений теплового баланса для газовой и нефтяной фазы, уравнения расхода теплоносителя, уравнения теплопроводности в двухмерной постановке с учетом фазовых превращений и миграции поровой влаги.

На рисунке 5.1 представлена схема передачи тепла от горячего теплоносителя в окружающую среду через ограждающую конструкцию резервуара [116].

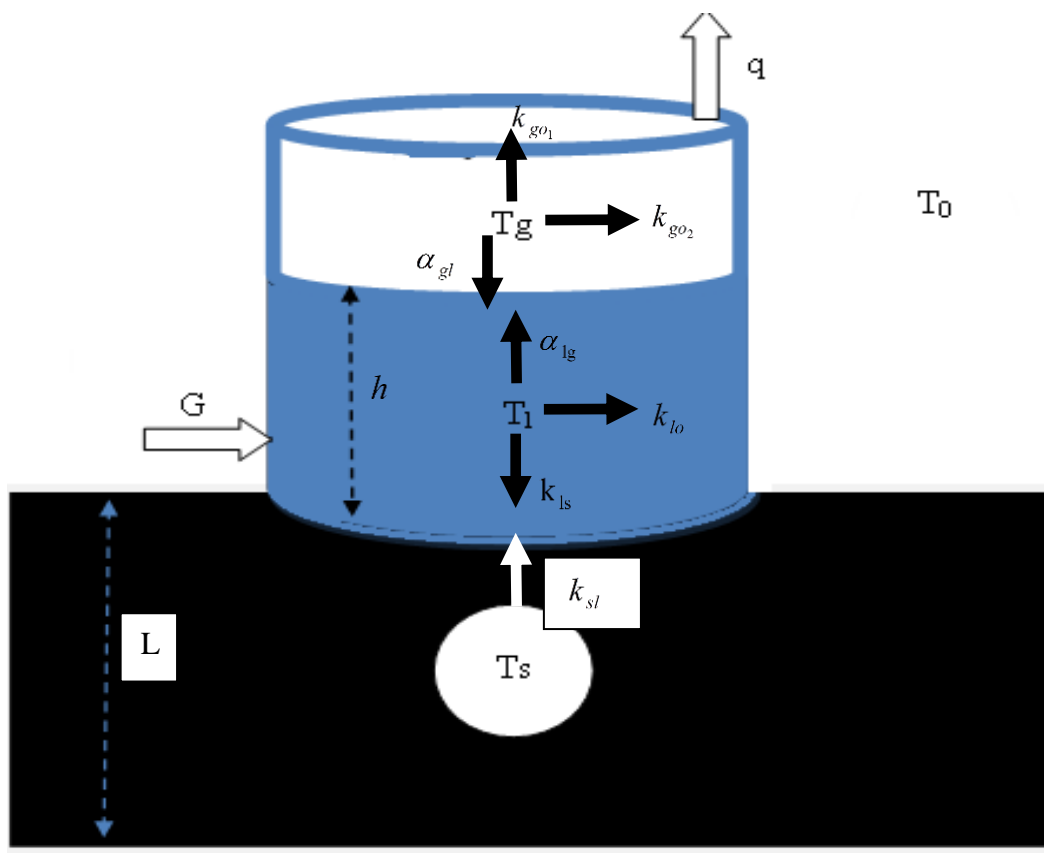


Рисунок 5.1 - Схема передачи тепла от горячего теплоносителя в окружающую среду через ограждающую конструкцию резервуара

Запишем теплофизическую модель [92, 116, 117].

Обозначим индексами  $g, l, s$ , соответственно, газовую, жидкую и грунтовую составляющие системы.

Модель взаимодействия конструкции с многолетнемерзлым грунтом описывается следующей системой уравнений [92, 116, 117]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(C_g \cdot \rho_g \cdot \pi R^2 \cdot (H-h) \cdot (T_g - T_0))}{\partial t} = -C_g \cdot \rho_g \cdot \pi R^2 \cdot (T_g - T_0) \cdot \frac{\partial(H-h)}{\partial t} + k_{go1} \cdot (T_g - T_0) \cdot \pi R^2 + \\ + k_{go2} \cdot (T_g - T_0) \cdot 2\pi R \cdot (H-h) - \alpha_{gl} \cdot (T_g - T_l) \cdot \pi R^2 \\ \frac{\partial(C_l \cdot \rho_l \cdot \pi R^2 \cdot h \cdot (T_l - T_0))}{\partial t} = C_l \cdot \rho_l \cdot \pi R^2 \cdot (T_{lo} - T_l) \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + k_{lo} \cdot (T_l - T_0) \cdot 2\pi R h + \\ + k_{ls} \cdot (T_l - T_s) \cdot \pi R^2 + \alpha_{lg} \cdot (T_l - T_g) \cdot \pi R^2 \\ \frac{\partial T_s}{\partial t} = a_s \cdot \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left( r \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right) + \mathcal{G}_r \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r} + \mathcal{G}_z \left( \frac{\partial T_s}{\partial z} \right), \\ \mathcal{G}_r = -K \cdot \frac{\partial w}{\partial r}, \mathcal{G}_z = -K \cdot \frac{\partial w}{\partial z} \\ G = \pi R^2 \cdot \frac{dh}{dt} \end{array} \right. \quad (5.1)$$

где  $T_0$  - температура окружающей среды, К;  $T_{lo}$  - температура теплоносителя на входе в резервуар при постоянном расходе  $G$ , К;  $k_{go1}$  - коэффициент теплопередачи через кровлю резервуара,  $\frac{Bm}{(m^2 \cdot K)}$ ;  $k_{go2}$  - коэффициент теплопередачи через боковую стенку резервуара в области газового пространства,  $\frac{Bm}{(m^2 \cdot K)}$ ;  $\alpha_{gl}$  и  $\alpha_{lg}$  - коэффициент теплообмена от газовой смеси к «горячему» теплоносителю и обратно,  $\frac{Bm}{(m^2 \cdot K)}$ ;  $k_{lo}$  - коэффициент теплопередачи через боковую стенку резервуара в области жидкого пространства,  $\frac{Bm}{(m^2 \cdot K)}$ ;  $k_{ls}$  - коэффициент теплопередачи через днище от «горячего» теплоносителя к фундаменту резервуара,  $\frac{Bm}{(m^2 \cdot K)}$ ;  $C_{g,l,s}$  и  $\rho_{g,l,s}$  - теплоемкость и плотность газовой смеси;

смеси, теплоносителя и грунта, соответственно,  $\frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}$ , м;  
 $R, H$  - радиус и высота резервуара, м;  $h$  - высота налива теплоносителя, м;  
 $G$  - расход теплоносителя,  $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ ,  $a_s$  - коэффициент температуропроводности грунта,  $\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}$ ,  $\vartheta_r$  и  $\vartheta_z$  - скорость фильтрации поровой влаги,  $K$  - изотермический коэффициент влажопроводности,  $\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}$ ,  
 $w$  - весовая влажность.

Поскольку такие параметры системы (5.1), как высота резервуара  $H$  и температура окружающей среды  $T_0$  величины постоянные, то их изменение равно нулю, система (5.1) преобразуется к следующему виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} (H - h) \cdot \frac{\partial T_g}{\partial t} = (T_g - T_0) \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{k_{g01}}{C_g \cdot \rho_g} \cdot (T_g - T_0) + \\ \frac{2 \cdot k_{g02}}{C_g \cdot \rho_g \cdot R} (T_g - T_0) \cdot (H - h) - \\ - \frac{\alpha_{gl}}{C_g \cdot \rho_g} \cdot (T_g - T_l) \\ h \cdot \frac{\partial T_l}{\partial t} = (T_{l0} - T_l) \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{2 \cdot k_{l0}}{C_l \cdot \rho_l \cdot R} (T_l - T_0) \cdot h + \frac{k_{ls}}{C_l \cdot \rho_l} \cdot (T_l - T_s) + \\ + \frac{\alpha_{lg}}{C_l \cdot \rho_l} \cdot (T_l - T_g) \\ \frac{\partial T_s}{\partial t} = a_s \cdot \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left( r \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right) + \vartheta_r \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r} + \vartheta_z \left( \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) \\ \vartheta_r = -K \cdot \frac{\partial w}{\partial r}, \vartheta_z = -K \cdot \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{dh}{dt} = \frac{G}{\pi R^2} = X = \text{const} \end{array} \right. \quad (5.2)$$

Вводим постоянные безразмерные коэффициенты [92]:

$$A_1 = \frac{k_{g01}}{C_g \cdot \rho_g}, B_1 = \frac{2 \cdot k_{g02}}{C_g \cdot \rho_g \cdot R}, C_1 = \frac{\alpha_{gl}}{C_g \cdot \rho_g} - \text{для газовой области};$$

$$A_2 = \frac{k_{ls}}{C_l \cdot \rho_l}, B_2 = \frac{2 \cdot k_{l0}}{C_l \cdot \rho_l \cdot R}, C_2 = \frac{\alpha_{lg}}{C_l \cdot \rho_l} - \text{для жидкой области}.$$

Также введем величину  $J = A_2 \cdot (T_l - T_s)$  - тепловой поток, который уходит через днище резервуара в грунт за единицу времени.

С учетом постоянных коэффициентов система (5.2) принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} (H-h) \cdot \frac{\partial T_g}{\partial t} = (T_g - T_0) \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + A_1 \cdot (T_g - T_0) + B_1(T_g - T_0) \cdot (H-h) - \\ \quad - C_1 \cdot (T_g - T_l) \\ \\ h \cdot \frac{\partial T_l}{\partial t} = (T_{l0} - T_l) \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + B_2(T_l - T_0) \cdot h + J + C_2 \cdot (T_l - T_g) \\ \\ \frac{\partial T_s}{\partial t} = a_s \cdot \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left( r \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right) + \vartheta_r \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r} + \vartheta_z \left( \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) \\ \quad \vartheta_r = -K \cdot \frac{\partial w}{\partial r}, \vartheta_z = -K \cdot \frac{\partial w}{\partial z} \\ \quad \frac{dh}{dt} = \frac{G}{\pi R^2} = X = const \end{array} \right. \quad (5.3)$$

Раскроем скобки и сгруппируем постоянные коэффициенты у неизвестных величин  $T_g$ ,  $T_l$ ,  $T_s$ , получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial t} = T_l \cdot \frac{C_1}{(H-h)} + T_g \cdot \left( \frac{(X+A_1-C_1)}{(H-h)} + B_1 \right) + T_0 \cdot \left( \frac{X-A_1}{(H-h)} - B_1 \right) \\ \frac{\partial T_l}{\partial t} = -T_g \cdot \frac{C_2}{h} - T_l \cdot \left( \frac{X+C_2}{h} + B_2 \right) - T_0 \cdot B_2 + \frac{J}{h} + \frac{T_{l0} \cdot X}{h} \\ \frac{\partial T_s}{\partial t} = a_s \cdot \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left( r \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right) + \vartheta_r \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r} + \vartheta_z \left( \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) \\ \quad \vartheta_r = -K \cdot \frac{\partial w}{\partial r}, \vartheta_z = -K \cdot \frac{\partial w}{\partial z} \\ \quad \frac{dh}{dt} = \frac{G}{\pi R^2} = X = const \end{array} \right. \quad (5.4)$$

В системе уравнений (5.4) первых два уравнения и четвертое являются частными неоднородными дифференциальными уравнениями первого порядка, третье уравнение является дифференциальным уравнением второго порядка.

Конечно-разностная аппроксимация системы (5.4) решается с использованием неявной схемы [116] со следующими начальными и граничными условиями:

Начальные условия:

при  $t = 0$   $h = 0$ ,  $T_g = T_0$ ,  $T_l = T_{lo}$ ,

$$J = k_{ls} \cdot (T_l - T_s) \cdot \pi R^2 = 0$$

на  $z = 0$   $T_s = T_0$

Граничные условия:

$$z > 0, T_s = T_s(z)$$

$$z = L, T_s = T(L) = const$$

$$J = k_{ls} \cdot \pi R^2 \cdot (T_l - T_s) = \lambda \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big|_{z=0}$$

## **5.2 Численная реализация модели системы «резервуар – основание – мерзлый грунт»**

По нестационарной двумерной модели тепломассопереноса в системе «резервуар – основание – мерзлый грунт», описанных в главе 3, был разработан численный алгоритм расчета параметров системы.

Программная реализация разработанного алгоритма выполнена в среде Delfi. Программа имеет модульную структуру. В первом модуле задаются исходные данные, необходимые для решения задачи. Во втором модуле вычисляются параметры резервуара (коэффициенты теплопередачи через стенку, кровлю и днище резервуара). В третьем модуле рассчитываются температуры газового пространства и теплоносителя, происходит перерасчет коэффициентов теплопередачи. В четвертом модуле вычисляется температурное поле основания и мерзлого грунта, с учетом конвективного переноса тепла за счет миграции влаги. В пятом модуле производится вывод полученных параметров в Excel. Визуализация полученных результатов была проведена в программах Excel и «SigmaPlot».

В четвертом модуле, для решения системы нелинейных уравнений, описывающих тепломассоперенос в грунте, используется неявный метод Ньютона. Известно, что этот метод имеет квадратичную сходимость решения, что позволяет не определять критерий сходимости решения.

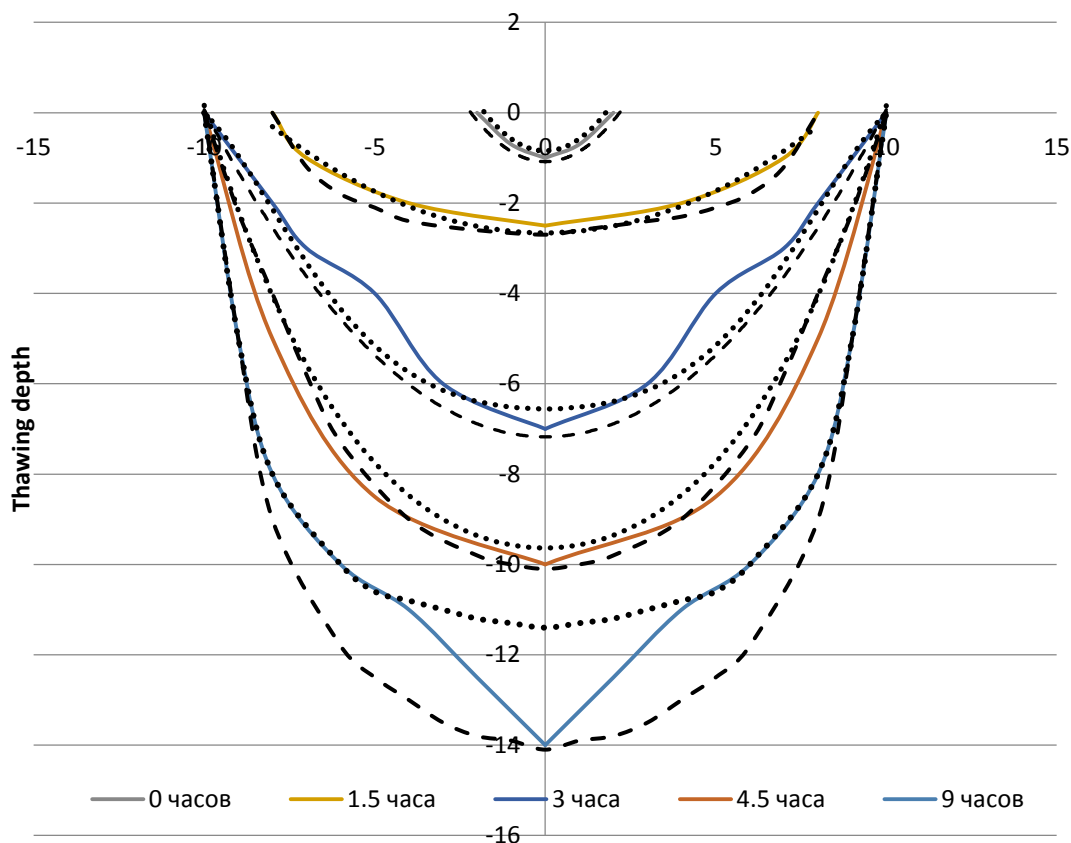
Блок-схема разработанного алгоритма численного решения искомой задачи тепломассопереноса системы «резервуар – основание – мерзлый грунт» приведена на рисунке 5.1.



**Рисунок 5.1 - Принципиальная блок-схема модели системы «резервуар – основание – мерзлый грунт».**

По результатам численного решения и экспериментального исследования на рисунке 5.2 представлены графики, отражающие динамику фронта протаивания грунта. Как видно, численное решение нестационарной теплофизической модели в системе «резервуар – основание» с учетом влияния миграции поровой влаги дает достаточно точное совпадение с экспериментальными данными нежели без ее учета.

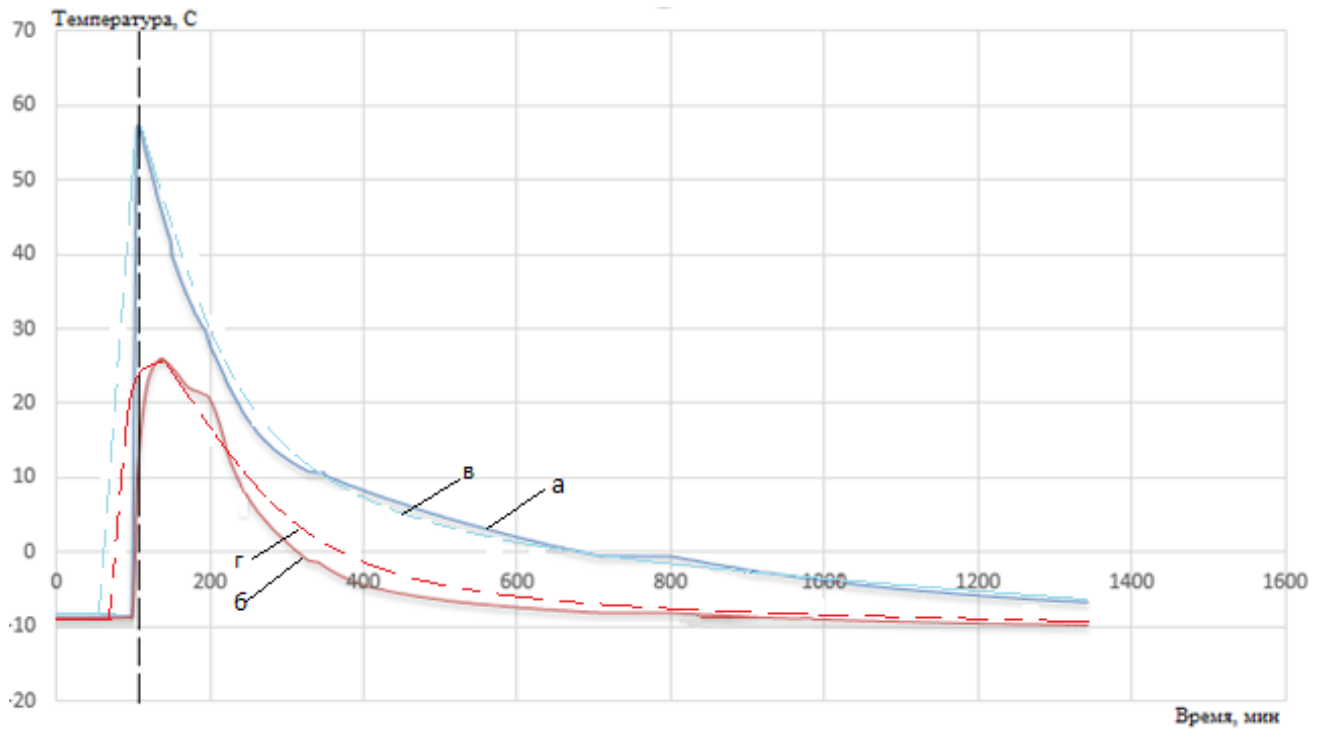
Также были построены графики изменения температуры газового пространства и горячего теплоносителя [116]. Удовлетворительное совпадение экспериментальных данных и численного решения представлено на рисунке 5.3.



**Рисунок 5.2 - Динамика фронта протаивания мерзлого грунта.**

**Примечание:** Сплошная линия – экспериментальные значения; ---- (пунктирная линия) – численное решение с учетом конвекции; \*\* - численное решение без учета конвекции.





**Рисунок 5.3 - Изменение температурного режима резервуара с течением времени.**

**Примечание: а, б –экспериментальные кривые; в, г – численное решение; а, в - кривые изменения температуры нефти в резервуаре; б, г - кривая изменения температуры газового пространства;**

## **Выводы по главе V.**

1. Численное решение, разработанной нестационарной теплофизической модели, учитывающей взаимное влияние тепла в системе «резервуар – основание – грунт», а также миграцию поровой влаги, дает достаточно удовлетворительное согласие с экспериментальными данными.
2. Предложенная модель может быть использована для расчета температурного режима мерзлых грунтов в естественных условиях, что позволит спрогнозировать процессы, происходящие в мерзлой породе, при разных производственных ситуациях, например, отказе систем термостабилизации грунта.
3. Описанная модель может быть адаптирована для прогнозирования тепловлажностного состояния многолетнемерзлых грунтов, оснований для прочих инженерных конструкций, например, трубопроводов, зданий, объектов топливно-энергетического комплекса.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.**

1. Экспериментально установлено существенное влияние миграции поровой влаги на форму и скорость движения фронта протаивания грунта в процессе теплового взаимодействия в системе «резервуар – основание – мерзлый грунт». Тем самым обоснована необходимость учета дополнительного потока тепла вызванного конвективной составляющей при моделировании процесса тепломассопереноса в мерзлом грунте под резервуаром.
2. Найдено приближенное аналитическое (квазистационарное) решение задачи Стефана с учетом конвективной составляющей в уравнении теплопроводности влажного грунта в цилиндрических координатах. Показано, что конвективный перенос тепла дает существенный (~30...40%) вклад в скорость протаивания по сравнению с расчетами, в которых пренебрегается конвекцией талой воды.
3. Разработана методика решения задачи теплового режима резервуара, которая позволяет определять температуру теплоносителя в любой момент времени в разные эксплуатационные периоды.
4. Разработана нестационарная теплофизическая модель тепломассопереноса системы «горячий резервуар - основание - мерзлый грунт», учитывающая миграцию поровой влаги. Результаты численного решения хорошо согласуются с экспериментальными данными и с приближенным аналитическим решением.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Цытович И.А. Механика грунтов: Краткий курс.: Учебник, изд.4-е.-М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 272 с.
2. Инструкция Методы ремонта элементов конструкций стальных вертикальных цилиндрических резервуаров после длительной эксплуатации. АК «Транснефть», 1997. – 56 с.
3. Буслаева И.И. Оценка несущей способности резервуаров при неравномерных осадках основания в условиях Севера: диссертация на соискание степени кандидата технических наук, Якутск. 2004. - 135 с.
4. Веревкин С.И. Повышение надежности резервуаров, газгольдеров и их оборудования / С.И. Веревкин, Е.Л. Ржавский. – М.: Недра, 1980. – 282 с.
5. Галеев В.Б. Эксплуатация стальных вертикальных резервуаров в сложных условиях. М.: Недра, 1981. – 149 с.
6. Матяш В.П. К математическому моделированию нестационарного теплообмена в стальных резервуарах с подогретыми нефтепродуктами // НТС: Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – М., ЦНИИТ Энефтехим, 1979. - №5. - С. 78-83.
7. Овчинников В.А. Исследование особенностей теплообмена нефтепродуктов у вертикальных поверхностей емкостей при их хранении и транспортировке. Автореферат дис. канд. техн. наук. М., 1976. – 23 с.
8. Розенштейн И.М. Аварии и надежность резервуаров/ И.М. Розенштейн. – М.: Недра, 1995. – 225 с.
9. Brooksbank D. and Andrews K. W. (1968) J. Iron Steel Inst. 106.-595 p.
10. Conrad H. Effect of grain size on then lower yield and flow stress of iron and stall// Acta met.-1963/-11, №1. – P. 75-77.
11. Currie I.G. Fundamental Mechanics. Megrow – Hill, 1974, P.205 – 2009.

12. Gladman T.Holmes B. ans Melvor LD. (1971). In «Effect of Second Phase Particles on the Mechanical Properties of Steels» p.68. Iron and Stell Institute. London.
13. Holroid R.J. On the behavior of open topped oil storage tanks in high winds. Part. II. Structural aspects. Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1985, 18/1, P. 53-73.
14. King J.E. and Knott J.F. (1981). Met.Sci. 15, I.- P. 187-192.
15. Krarti Moncef, Chuangchid Pirawas. Steady-Periodic Three-Dimensional Foundation Heat Transfer From Refrigerated Structures. Joint Center for Energy Management, CEAE Department, CB 428. University of Colorado at Boulder, Boulder, CO 80309.
16. Krarti Moncef, Chuangchid Pirawas Steady-State Component of Three-Dimensional Slab-on-Grade Foundation Heat Transfer. Joint Center for Energy Management, CEAE Dept., CB 428, University of Colorado at Boulder, Boulder, CO 80309.
17. William P. Bahnfleth Three-Dimensional Modelling of Heat Transfer From Slab Floors USACERL Technical Manuscript E-89/11.July 1989.
18. Котляровский В.А., Шаталов А.А., Ханухов Х.М. Безопасность резервуаров и трубопроводов. М., Изд-во «Экономика и информатика», 2000. - 555 с.
19. Афонская Г.П. Систематизация и моделирование отказов сооружений для хранения нефтепродуктов/ Г.П. Афонская, А.А. Николаева, В.А. Прохоров, В.В. Филлипов. – Якутск: ЯГУ, 1997. – 50 с. Деп. В ВИНТИ 01.06.98.- №1702 – В98.
20. Кондрашова О.Г. Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров /О.Г. Кондрашова, М.Н. Назарова // Нефтегазовое дело. – М., 2004. – С. 8-10.
21. Купреишвили С.М. Механика разрушения вертикальных цилиндрических резервуаров / С.М. Купреишвили // Промышленное и гражданское строительство. 2004. №5. – С. 63-68.

22. Филлипов В.В., Прохоров В.А., Аргунов С.В., Буслаева И.И. Техническое состояние резервуаров для хранения нефтепродуктов объединения «Якутнефтепродукт» // Известия вузов. Строительство. – 1993. №7-8. - С. 13-16.
23. Филлипов В.В. Оценка экологического ущерба при авариях резервуаров в условиях Севера / В.В. Филиппов, В.А. Прохоров // Защита – 95. М., 1995. - С. 55-56.
24. Землянский А.А. Принципы конструирования и экспериментально-теоретические исследования крупногабаритных резервуаров. Диссертация на соискание доктора технических наук, 2006 г. Балаковский институт техники, технологии и управления (филиал) Саратовский государственный технический университет, 417 с.
25. Deru M., Ph.D. A Model for Ground-Coupled Heat and Moisture Transfer from Buildings National Renewable Energy Laboratory. 1617 Cole Boulevard, Golden, Colorado 80401-3393. NREL is a U.S. Department of Energy Laboratory. Operated by Midwest Research Institute • Battelle • Bechtel. Contract No. DE-AC36-99-GO10337.
26. Буслаева И.И. Исследование причин отказов резервуаров / И.И. Буслаева, В.А. Прохоров // Металлостроительство – 96: Сб.трудов Межд.конференции. – Т.2 – Донецк – Макеевка: ДГАСА, 1996. – С. 49-50.
27. Даниэлян Ю.С. Вывод точного аналитического вида нижнего граничного условия в задачах промерзания и оттаивания./Сборник статей «Теплофизика, гидродинамика, теплотехника». Выпуск №1, 2004. С.14-19.
28. Кислицын А.А. Основы теплофизики: Лекции и семинары. Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2002. – 152 с.
29. Тугунов П.И. и др. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов: Учебное пособие для вузов/ П.И. Тугунов, В.Ф. Новоселов, А.А. Коршан, А.М. Шаммазов, под ред.

А.А. Коршака, 3-е изд., испр. – УФА: ДизайнполиграфСервис, 2008. – 658 с.

30. Тугунов П.И. Нестационарные режимы перекачки нефтей и нефтепродуктов. – М.: Недра, 1984. - 244 с.

31. Тугунов П.И., Самсонов А.Л. Основы теплотехники, тепловые двигатели и паросиловое хозяйство нефтебаз и перекачивающих станций. Учебник для техникумов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., Недра, 1979. – 272 с.

32. Суворов А.Ф., Лялин К.В. Сооружение крупных резервуаров. М., «Недра», 1979. – 224 с.

33. Клевекко В.И. Оценка напряженно-деформированного состояния армированных оснований в пылевато-глинистых грунтах. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Уфа, 2002.

34. Сафарян М.К. Стальные резервуары для хранения нефтепродуктов. – М.: ОНТИ, 1958г. – 240 с.

35. Тишин В.Г. Основания и фундаменты объектов нефтяной и газовой промышленности. – М.: Недра, 1985. – 174 с.

36. Цытович Н.А. Исследование деформаций мерзлых грунтов: Диссертация на соискание степени доктора физико-математических наук. Ленинград, 1940. – С. 45-48.

37. Даниэлян Ю.С., Калиева Д.К., Третьяков П.Ю. Приближенный метод расчета тепловых полей вокруг заглубленных емкостей произвольной формы. Нефтяное хозяйство, №2 2009. - С. 40-42.

38. Даниэлян Ю.С., Яницкий П.А. О кинетике замерзания воды во влажных грунтах // Изв. СО АН СССР. – 1979. – 13, 3. – С. 89-92.

39. Шишкин Г.В. Справочник по проектированию нефтебаз. Л., Недра, 1978. – 216 с.

40. Аболин Р.И. Постоянная мерзлота грунтов и ископаемый лед // Зап. Читинского отделения Приамурского отдела ИРГО. – 1913. – вып.9.

41. Аварии большого резервуара в Японии / пер. с англ. Ж.Хайкан Гидзюцу. – М., 1975, т.8. №5. – С. 128-142.
42. Богданов Н.Ф. Физико-химические основы процесса кристаллизации парафина из растворов.. Тр. ГрозНИИ «Проблемы переработки нефти» Гостоптехиздат, 1949. С. 50-61.
43. Гольдштейн М.Н. Деформация земляного полотна в основании сооружений при промерзании и оттаивании. М., Трансжелдориздат, 1948. – 211 с.
44. Евтихин В.Ф. Эксплуатация резервуаров объемом 50 тыс.м<sup>3</sup> с плавающей крышей / В.Ф. Евтихин // НТРС. Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1976. №6. – С. 8-11.
45. Губин В.Е., Губин В.В. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. М., Недра, 1982. – 296 с.
46. Даниэлян Ю.С., Аксенов Б.Г., Лукичев В.Ф. Прогнозирование сезонных изменений температурного поля во влажных грунтах//Проблемы нефти и газа в Тюмени. – 1984. – Вып.61. – С. 78-82.
47. Дерягин Б.В., Чураев Н.В. Течение незамерзающих прослоек воды и морозное разрушение пористых тел // Коллоид.журнал. – 1980. – 42, 5. С. 842-852.
48. Долгих Г.М., Аникин Г.В., Рило И.П., Спасенникова К.А. Статическое моделирование работы системы «Гет», установленной в основании нефтяного резервуара. Тюмень, Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 1, С. 70–77.
49. Оржеховский Ю.Р., Дерябин Г.Н., Оржеховская Р.Я. Определение деформационных характеристик оттаивающих грунтов. Сборник статей второго Всесоюзного семинара «Инженерно-геологическое изучение и оценка мерзлых, промерзающих и протаивающих глинистых грунтов (ИГК-90)». ВНИИГ им Б.Е. Веденеева, 1993. - С. 12-20.



50. Пузаков Н.А. Предохранение дорожного полотна от грунтовых вод // Сборник СоюздорНИИ: Регулирование водного режима дорожных оснований. – М.: Дориздат, 1946. – С. 86-128.
51. Рабинович И.Н., Кульбицкий В. Влияние отапливаемых зданий на глубину промерзания грунта. – «Жил. Стр-во», 1965, №6, С. 12-14.
52. Региональные и теплофизические исследования мерзлых горных пород в Сибири. Якутск, кн. изд-во, 1976. – 223 с.
53. Штыков В.И. Об определении коэффициентов фильтрации оттаивающих мерзлых связных грунтов. Сборник статей второго Всесоюзного семинара «Инженерно-геологическое изучение и оценка мерзлых, промерзающих и протаивающих глинистых грунтов (ИГК-90)». ВНИИГ им Б.Е. Веденеева, 1993. - С. 83-86.
54. Шушерина Е.П. Изменения физико-механических свойств грунтов под действием промерзания и последующего оттаивания. – В кн.: Материалы по физике и механике мерзлых грунтов. VII Междугосударств. совещ. по мерзлотоведению. М., 1959. - С. 48-55.
55. Гречищев С.Е. Кинетика фазовых переходов, температурные деформации и пучение мерзлых грунтов // Криосфера Земли. – 1997. – 1,3. – С. 30-34.
56. Гречищев С.Е. Ползучесть мерзлых грунтов при сложнонапряженном состоянии. – В Кн.: Прочность и ползучесть мерзлых грунтов М., 1963. - С. 55-124.
57. Бредюк Г.П. Определение величины и интенсивности пучения промерзающих грунтов // Материалы по физике и механике мерзлых грунтов. М.: Изд-во АН СССР, 1959. – С. 62-68.
58. Даниэлян Ю.С. Исследование неравновесного теплопереноса в грунтах с фазовыми превращениями влаги применительно к проектированию обустройства нефтяных месторождений. Диссертация на соискание доктора физико-математических, 2006 г. Тюмень, 417 с.

59. Даниэлян Ю.С., Зайцев В.С. Определение коэффициента теплопроводности больших массивов грунтов. Нефтяное хозяйство, №5 2009. - С. 98-100.
60. Даниэлян Ю.С., Аксенов Б.Г. Теплопередача и деформация в промерзающих рыхлых грунтах // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1991. – 2. – С. 168-173.
61. Аксенов Б.Г. Исследование процессов тепломассообмена в грунтах, строительных материалах и сооружениях: Автореф. дис. на соискание степени д-ра физ.-мат. наук. – Тюмень, 1994. – 48 с.
62. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне. Справочное пособие. Новосибирск. Изд-во Сибирского отделения РАН, 2004. – 146 с.
63. Гаврильев Р.И. Обобщение взаимосвязи тепловых и физических свойств различных типов грунтов и торфяников// Мерзлые грунты при инженерных воздействиях. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-е, 1984. – С. 14-28.
64. Горелик Я.Б., Колунин В.С. Физика и моделирование криогенных процессов в литосфере. / Отв. Ред. Акад. В.П. Мельников. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал «Гео», 2002. – 317с.
65. Горелик Я.Б., Колунин В.С. О миграции влаги при промерзании пористых сред // III всесоюзная конференция по механике и физике льда. Тезисы докладов. – М., 1988б. – С. 27.
66. Горелик Я.Б., Колунин В.С. Моделирование льдонакопления при промерзании массива грунта // Криосфера Земли. -2000. – 4, 2. С. 41-51.
67. Цытович Н.А. Строительство в условиях вечной мерзлоты. Тезисы докладов на Конференции СОПС АН СССР. Изд-во АН СССР, 1941.- С. 15-16.
68. Аварии и катастрофы. Кн.4. Предупреждение и ликвидация последствий/ В.А. Котляревский А.В. Забегаев – М.: Изд.АСВ, 1998. - 203 с.

69. Адамов В.А. Сжигание мазута в топках котлов. – Л.: Недра, 1989. – 304 с.
70. Альтшуллер Л.М. Температурное поле цилиндрического источника в полуограниченном массиве. – «Инж.-физ.журн.», 1961, №3. С. 64-71.
71. Акимов Ю.П. Сравнительная оценка методов определения содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах // Мерзлотные исследования. Вып.17. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. – С.190-196.
72. ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. Государственный комитет СССР по делам строительства. – М.: Стандартиформ, 1985. – 19 с.
73. Горковенко Александр Иванович. Основы теории расчета пространственного положения подземного трубопровода под влиянием сезонных процессов : дис. д-ра техн. наук : 25.00.19 Тюмень, 2006. - 305 с.
74. Гоц В.Л. Методы нанесения лакокрасочных покрытий на внутреннюю поверхность труб. Борьба с отложениями парафина. – Под редакцией Г.А. Бабаляна. М., Изд-во «Недра», 1965. - С. 271-276.
75. Иванов И.С. Тепло- и массоперенос в мерзлых горных породах. М., «Наука», 1969. - 239 с.
76. Иванов Н.С. Теплообмен в криолитозоне. – М.:Наука, 1962. – 200 с.
77. Правила безопасности 03-605-03. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. Постановление Госгортехнадзора России от 9 июня 2003., №76. – 79 с.
78. Пчелинцев А.М. Строение и физико-механические свойства мерзлых пород. – М.: Наука, 1966. – 156 с.
79. Ржавский Е.Л. Методы и средства борьбы с потерями нефти и нефтепродуктов при транспорте и хранении/ Е.Л. Ржавский// Сер. Транспорт и хранение нефти, нефтепродуктов и углеводородного сырья. – М.: ВНИИОЭНГ, 1983. – С. 65.

80. Афанасьев В.А., В.Л. Березин Сооружения газохранилищ и нефтебаз: Учебник для вузов. – М.: «Недра», 1986. – 334 с.
81. Самарский А.А. Теория разностных схем. – 3-е изд., испр. – М.: Наука. Гл.ред. физ.-мат. лит., 1989. – 616 с.
82. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1972. – 735 с.
83. Порхаев Г.В. Тепловое взаимодействие зданий и сооружений с вечномерзлыми грунтами. М.:Изд-во «Наука», 1970. – 208 с.
84. Головкин М.Д. Метод расчета чаши протаивания в основаниях зданий, возводимых на многолетнемерзлых грунтах. Изд. Лаборатории гидравлических и электрических аналогий им. В.С. Лукьянова, ЦНИИС Минстроя, 1958. – С. 24-38.
85. Справочник по строительству на вечномерзлых грунтах. Под ред. Ю.И. Вели, В.И. Докучаева, Н.Ф. Федорова. –Л.: Стройиздат, 1977. – 552 с.
86. Карпов Д.Ф., Синицын А.А., Белянский Д.А., Вельсовский А.Ю. «Расчетно-экспериментальные исследования распределения температурных полей при искусственном оттаивании мерзлого грунта» Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. Издательство: Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2010 №2 (14). - С. 149-154.
87. Самовсасывающие насосы с реверсом типа ВЕ и NOVAX [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.roverprom.ru/revers.php> [дата обращения: 01.07.2018].
88. Михайлов П.Ю. Динамика тепломассобменных процессов и теплосилового взаимодействия промерзающих грунтов с подземным трубопроводом: дисс. ... канд. физ.-мат. Наук: 01.04.14 / Михайлов Павел Юрьевич. – Тюмень, 2012. – 175 с.
89. Шастунова У.Ю. Теплофизика. Тепломассоперенос и теплотехника. Расчетно-экспериментальное исследование тепломассопереноса при

нестационарных условиях: научное издание / У. Ю. Шастунова, Б.В. Григорьев, Л.А. Пульдас, А.В. Шаталов, Ю.Ф. Янбикова, Я.А. Кузьменкова, Д.Ю. Легостаев. - Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2016. – 47 с.

90. Shastunova U. Yu. Experimental study and a mathematical model of the processes in frozen soil under a reservoir with a hot heat-transfer agent / A. A. Kislitsyn, U. Yu. Shastunova, Yu. F. Yanbikova // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2018. - Vol. 91, №.2.– P. 507-514.

91. Шастунова У.Ю. Экспериментальное и теоретическое исследование процесса протаивания мерзлого грунта под резервуаром для хранения нефтепродуктов [Электронный ресурс] / У. Ю. Шастунова, А. А. Кислицын // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. - 2015. - Т. 1, № 6. - С. 15-25.

92. Шастунова У.Ю. Исследование температурного режима резервуара с нефтепродуктами в зимнее время / У. Ю. Шастунова, Д.А. Дмитриевская // Вестник Тюменского государственного университета. - 2016. - Вып. том 2, №1. - С. 26-33.

93. Шастунова У.Ю. Экспериментальное исследование температуры стенки стального резервуара с горячим нефтепродуктом в зимнее время / Б. В. Григорьев, У. Ю. Шастунова, Ю. Ф. Янбикова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2017. Том 3. № 3. - С. 29-39.

94. Shastunova U. Physical and mathematical modeling of process of frozen ground thawing under hot tank /M.Y.Zemenkova, U Shastunova, A Shabsrov, A Kislitsyn, A Shuvaev // International Conference “Transport and Storage of Hydrocarbons”. IOP Conf.Series^ Vaterials Science and Engineering 357 (2018) 012007.

95. Шастунова У.Ю. Тепловой режим гидравлических испытаний резервуара вертикального стального объемом 20000 м<sup>3</sup> / Г.В. Бахмат, А.А. Кислицын, У.Ю. Шастунова // Сборник статей «Вестник ТюмГУ». Тюмень: Издательство ТюмГУ. - 2011. - №7. - С. 64-72.
96. Шастунова У.Ю. Расчет системы охлаждения мерзлого грунта под резервуаром с мазутом / У. Ю. Шастунова, Ю.Ф. Янбикова // Достижения и проблемы современной науки: сборник статей Международной научно-практической конференции. - 2015. - Вып. часть 1. - С. 48-54.
97. Шастунова У.Ю. Методика расчета теплового воздействия горячего резервуара на мерзлый грунт / У. Ю. Шастунова, Ю.Ф. Янбикова // Наука сегодня: сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. - 2015. - Вып. часть 1. - С. 80-83.
98. Шастунова У.Ю. Методика расчета теплового режима резервуара типа РВС в зимнее время во время эксплуатации / У. Ю. Шастунова, А. А. Кислицын, Г. В. Бахмат // Материалы Международной научно-практической конференции по инженерному мерзлотоведению, посвященной XX-летию создания ООО НПО «Фундаментстройаркос». - 2011. - С. 301-306.
99. Стандарт организации СТО 0030-2004 Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Правила технического диагностирования, ремонта и реконструкции.
100. Стандарт организации СТО 02494680-0044-2008 Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для хранения жидких продуктов. Правила проведения испытаний на прочность, устойчивость и герметичность.
101. Бродов Ю.М., Ниренштейн М.А. Расчет теплообменных аппаратов паротурбинных установок: Учебное пособие. Екатеринбург: УГТУ, 2001. – 373 с.

102. Степанов О.А., Мисеев Б.В., Хоперский Г.Г. Теплоснабжение на насосных станциях нефтепровода. – М.: ОАО «Изд-во «Недра», 1998. - 301 с.
103. Вакулин А.А. Основы геокриологии: учеб. пособие для студентов вузов. - Тюмень: Изд-во ТюмГУ, 2011. - 220 с.
104. Jame Y.W. Heat and mass transfer in freezing unsaturated soil. Thesis // Submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in the Department of Agricultural Engineering University of Saskatchewan Saskatoon, Canada, 1977.
105. Кудрявцев В.А., Достовалов В.Н., Романовский Н.Н., Кондратьева К.А., Меламед В.Г. Общее мерзлотоведение. М.: Изд-во МГУ, 1978. - 464 с.
106. Матяш В.П. К математическому моделированию нестационарного теплообмена в стальных резервуарах с подогретыми нефтепродуктами // НТС: Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – М., ЦНИИТ Энефтехим, 1979. - №5. – С. 2-8.
107. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. - М.: Наука, 1964. – 488 с.
108. Кислицын А. А., Морар А. В. Приближенное решение фронтовым методом двумерной задачи об образовании лунки в металле под действием импульса ОКГ. Инженерно–Физический Журнал. 1976. Т. 30, № 3. - С. 540–545.
109. Кислицын А. А., Морар А. В. Решение фронтовым методом двумерной задачи об испарении металлического конуса под действием излучения большой мощности. Теплофизика высоких температур. 1976. Т. 15, № 5. - С. 1030–1033.
110. Решетников, А.К. Численное моделирование процессов теплопереноса и деформирования в мерзлых грунтах: автореферат

дис. ... кандидата геолого-минералогических наук: 25.00.10 / Тюменский научный центр. - Тюмень, 2002. - 22 с.

111. Gorelik J.B., Kolunin V.S., Reshetnikov A.K. Barothermic effect and temperature regime of frozen soil // Advances in cold-region thermal engineering and sciences. Proc. 6th Int. Symp., Darmstadt, Germany, 22-25 August 1999. Springer, 1999, 465-474.

112. Harlan, R. L., 1973: Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil. Water Resour. Res., 9, 1314–1323.

113. Guymon, G. L., and J. N. Luthin, 1974: A coupled heat and moisture transport model for arctic soils. Water Resour. Res., 10, 995–1001.

114. Nakano, Y. and Brown, J. 1971 : Effects of a freezing zone of finite width on the thermal regime of soils. Water Resour. Res., 7: 1226-1233.

115. Gessen F.W., Howell I.N. Effect of flow rate on paraffin accumulation in plastic steel and coated pipe. J. of Petroleum Technology @ "AIME, vol 10, N=4, april 1958.

116. Shastunova U. Thermal interference of engineering construction with permafrost ground as bottom / Ulyana Shastunova, Pavel Michailov // International Science Conference SPbWOSCE-2016 "SMART City" St. Petersburg, Russia, November 15-17, 2016. - №1. – 02018 (Section 2 Buildings and Structures. Basement and foundations).

117. Шастунова У.Ю. Физико-математическое моделирование полей температуры и льдистости в мерзлых грунтах вокруг заглубленного трубопровода / У. Ю. Шастунова, А. Б. Шабаров [и др.] // Материалы Международной научно-практической конференции по инженерному мерзлотоведению, посвященной XX-летию создания ООО НПО «Фундаментстройаркос». - 2011. - С. 225-229.

118. Порхаев Г.В. Методика теплотехнических расчетов теплового взаимодействия нефте- и газопроводов с промерзающими и протаивающими грунтами. – В кн. Материалы к учению о мерзлых зонах земной коры. Вып.8, М., 1962. - С. 75-112.