

На правах рукописи



Шастунова Ульяна Юрьевна

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

Специальность 01.04.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Тюмень - 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский государственный университет» (ФГАОУ ВО «ТюмГУ»).

Научный руководитель Доктор физико-математических наук, профессор,
Кислицын Анатолий Александрович

Официальные оппоненты Доктор физико-математических наук, профессор
Ахметова Оксана Валентиновна
(Стерлитамакский филиал Башкирского
государственного университета, заведующая
кафедрой общей и теоретической физики)

Кандидат физико-математических наук, доктор
геолого-минералогических наук,
Горелик Яков Борисович
(Институт криосферы Земли СО РАН, главный
научный сотрудник, заведующий лабораторией
тепломассообменных явлений)

Ведущая организация ПАО «Гипротюменнефтегаз» (Тюменский
проектный и научно-исследовательский институт
нефтяной и газовой промышленности
им. В.И. Муравленко) (г. Тюмень)

Защита состоится 26 декабря 2018 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета
Д212.274.10 при ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» по адресу: 625003,
г. Тюмень, ул. Перекопская 15а, ауд. 410.

Тел.: 89129946831
e-mail: u.y.shastunova@utmn.ru

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре
ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» и на сайте
<https://diss.utmn.ru/sovet/diss-sovet-212-274-10/zashchita/585619/>

Автореферат разослан «___» октября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.274.10
д. ф.-м. н.

Удовиченко С.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

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 эксплуатацию 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 проверки адекватности 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 теплопереноса 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 уточнения физико-математической модели, учитывающей основные факторы, влияющие на оценки ореола протаивания ММП под горячим резервуаром.
2. Создать экспериментальную установку для изучения ореола оттаивания мерзлого грунта под горячим резервуаром и выявления необходимости учета конвективного теплопереноса при решении задачи Стефана о протаивании мерзлого грунта.
3. Получить результаты приближенного аналитического решения 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 влияния 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 $T = 0$ °С) с течением времени. Показано существенное влияние на нулевую изотерму наличия в поровом пространстве грунта свободной воды и ее движения.

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

4. Впервые предложена и изучена физико-математическая модель, описывающая тепломассоперенос в системе «мерзлый грунт - основание – горячий резервуар», учитывающая конвективный перенос свободной поровой влаги после оттаивания грунта под горячим резервуаром и взаимное влияние элементов системы. 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 тепло-технического расчета ореола оттаивания под резервуаром.

Основные положения, выносимые на защиту:

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

2. Установленный факт существенного влияния конвективного теплопереноса в уравнении теплопроводности при решении задачи теплового взаимодействия горячего резервуара с протаивающими грунтами.

3. 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, дают возможность учесть совокупность факторов и внести уточнения в процесс моделирования тепловой задачи в системе

«конструкция – основание - мерзлый грунт».

Разработанная физико-математическая модель тепломассопереноса в системе «горячий резервуар – основание – мерзлый грунт» и методика расчета теплового воздействия резервуара с горячим теплоносителем на мерзлый грунт с учетом конвективного переноса тепла свободной поровой водой может быть использована при модернизации существующих программных комплексов, предназначенных для проектирования нефтехранилищ и других объектов на структурно неустойчивых грунтах.

Разработанная экспериментальная установка позволяет изучать тепловые процессы, происходящие в мерзлом грунте, при влиянии на него тепловых потоков от инженерных конструкций.

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 разработке физико-математической модели тепломассопереноса в системе «горячий резервуар – основание – мерзлый грунт», создании экспериментальной установки и проведении экспериментальных и теоретических 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. В опубликованных совместно с соавторами научных статьях вклад соавторов равнозначен.

Апробация работы

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

- Международная научно - практическая конференция молодых ученых и специалистов «Стратегия инновационного развития, строительства и освоения районов Крайнего Севера», посвященная 20-летию ООО НПО «Фундаментсройаркос» (Тюмень, 2011 г.);
- Международная научно-практическая конференция «Наука сегодня» (Вологда, 2015);
- Международная научно-практической конференции «Достижения и проблемы современной науки» (Уфа, 2016 г.);
- Региональный конкурс студенческих научных работ – 2015, ТюмГНГУ (Тюмень, 2015 г.);
- X-я школа-семинар «Теплофизика, гидрогазодинамика и инновационные технологии» под руководством заслуженного деятеля науки, д.т.н., процессора А.Б. Шабарова (Тюмень, 2016);
- 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 6 статьях, входящих в перечень ВАК. Их список приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Материал изложен на 152 страницах, включает 48 рисунков, 13 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 118 источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, формулируются цели и задачи исследования, пути их решения, изложена научная новизна, практическая значимость работы, приведены основные результаты и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору основных причин аварий резервуарных парков. Описан процесс тепломассопереноса в инженерной конструкции и в грунте, рассмотрены свойства грунтов, неизотермический влагоперенос, существующие методики расчетов температурных полей под горячими конструкциями, проведен анализ существующих физико-математических моделей, которые описывают систему «конструкция - основание - грунт».

Проведенный в этой главе анализ физико-математических моделей, описывающих тепловое взаимодействие инженерной конструкции с просадочными грунтами, показал, что для корректного описания системы с таким взаимодействием, недостаточно, в ряде случаев, учитывать лишь обычно используемые параметры, такие как радиацию, наличие ветра, облачности и т.д. Для получения более достоверных оценок теплового состояния грунта под резервуаром необходимо учитывать влияние дополнительного переноса тепла, который осуществляется переносом свободной поровой влаги в оттаявшем грунте.

Вторая глава посвящена технологической схеме экспериментальной установки и методике проведения эксперимента по изучению теплового влияния горячего резервуара на мерзлый грунт, изменении температур внутри резервуара в газовом и жидкостном пространстве.

Экспериментальные данные по изучению влияния теплового потока от горячего резервуара в мерзлый грунт подтверждают ранее выявленное возникновение вертикального фильтрационного потока талой воды, и, благодаря этому, существенное (примерно в два раза) увеличение средней скорости движения фронта протаивания. Здесь же обосновывается необходимость учета конвекционной составляющей в уравнении теплопроводности при решении задачи Стефана и изменении физико-математической модели в системе «резервуар-основание-грунт».

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Нагрев нефти осуществляется в системе коаксиальных сосудов. Согласно действующим стандартам температура нефтепродуктов в нефтехранилище может достигать 40°C. Используемый в эксперименте грунт представлен супесями. Исследование теплофизических свойств грунта было проведено Тюменским проектным и научно-исследовательским институтом нефтяной и газовой промышленности им. В.И. Муравленко ПАО «Гипротюменнефтегаз». Данные исследования приведены в таблице 1.

Таблица 1. Теплофизические свойства грунта

Плотность, кг/м ³	2083	
Влажность, %	21	
Теплопроводность, Вт/(м·К)	мерзлый грунт	3,13
	талый грунт	2,38
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	мерзлый грунт	0,95
	талый грунт	1,06

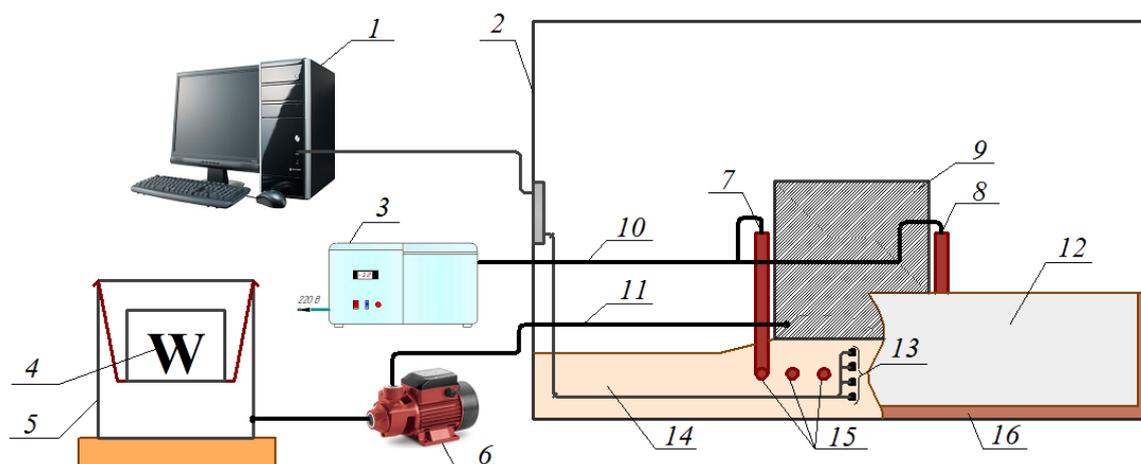


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки: 1 – персональный компьютер; 2 – климатическая камера 2250x1600x2000 мм; 3 – криостат; 4 – нагревательный элемент; 5 – емкость для нагрева нефти; 6 – насос; 7 – вход в систему охлаждающих труб; 8 – выход из системы охлаждающих труб; 9 – модель резервуара 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 1190x1290x350мм.

Влажность грунта непосредственно перед проведением эксперимента была определена методом высушивания до постоянной массы согласно ГОСТ 5180-84.

Автоматизированная система измерения температуры в модели грунта состоит из 50 цифровых датчиков температуры DS18B20, подключенных к персональному компьютеру через COM порт (Рис. 2 и 3). Поскольку рассматриваемая задача радиально-симметрична, датчики расположены по радиусу резервуара. В целях минимизации погрешности измерений вследствие смещения датчиков применена решетка для их фиксации. Для работы с датчиками используется программа TempKeeper, с помощью которой осуществляется считывание и сохранение показаний температуры.

Метрологические характеристики датчика: диапазон измеряемых температур от минус 55 °С до 125 °С; абсолютная погрешность не превышает $\pm 0,5$ °С в диапазоне температур от минус 10 °С до 85 °С. Перед проведением эксперимента все датчики прошли калибровку.

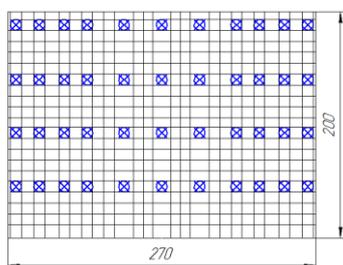


Рисунок 2 – Схема расположения температурных датчиков

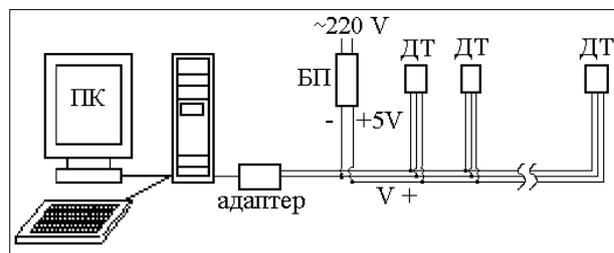


Рисунок 3 - Схема подсоединения датчиков температуры к персональному компьютеру. ПК – персональный компьютер; БП – блок питания; ДТ – датчики температуры.

Перед началом эксперимента была запущена в работу климатическая камера, и произведено охлаждение грунта до -10°C . После этого был включен подогрев резервуара, и показания температуры считывались с датчиков с интервалом в 3 минуты. По истечении девяти часов эксперимент был завершен.

В начале закачки пустого «холодного» резервуара температура нефти резко упала, что объясняется передачей тепла холодным стенкам и днищу резервуара. Но спустя небольшое время, как только сталь нагрелась, температура теплоносителя стала увеличиваться и достигла значения, до которого была разогрета в резервуаре для нефти.

В режиме выстаивания температура нефти уменьшалась по экспоненциальной зависимости, что хорошо согласуется с описанной зависимостью Тугунова.

Что касается изменения температуры газового пространства, то в связи со сложной картиной конвективных потоков газа внутри резервуара, температура увеличивалась и после достижения максимальной температуры нефти, и достигнув максимального значения 24°C стала уменьшаться по экспоненциальной зависимости.

При исследовании теплового состояния грунта резервуар был заполнен до 25% от всего объема и температура теплоносителя поддерживалась постоянной. По показаниям датчиков с помощью программного пакета Sigma Plot были построены поля температур в мерзлом грунте в различные моменты времени. Некоторые результаты приведены на рисунках 4-7.

На этих рисунках видно, что протаивание грунта начинается через несколько минут после начала прогрева; через 10 минут нулевая изотерма находится на глубине ≈ 1 см; в дальнейшем температура грунта растет, ореол протаивания увеличивается, и в момент окончания эксперимента (9 часов) глубина оттаивания достигает 14 см. 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.

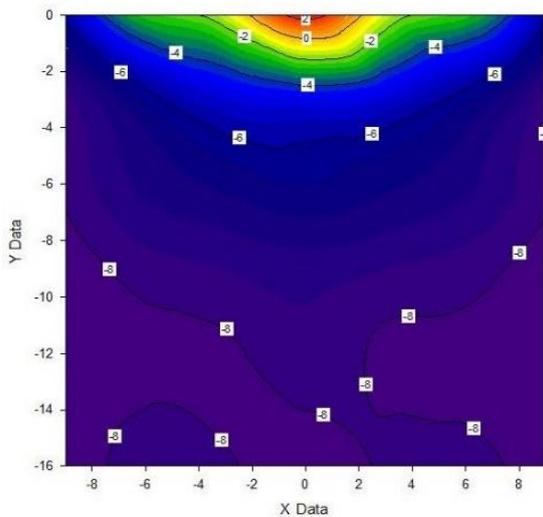


Рисунок 4 - Температурное поле грунта через $t = 10$ минут после включения подогрева.

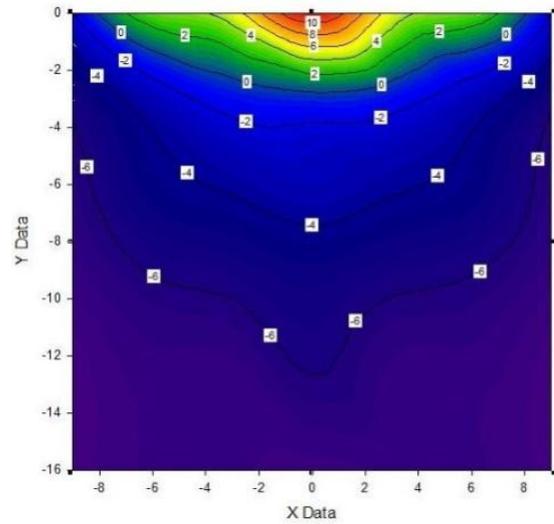


Рисунок 5 - Температурное поле грунта через $t = 1.5$ часа после включения подогрева.

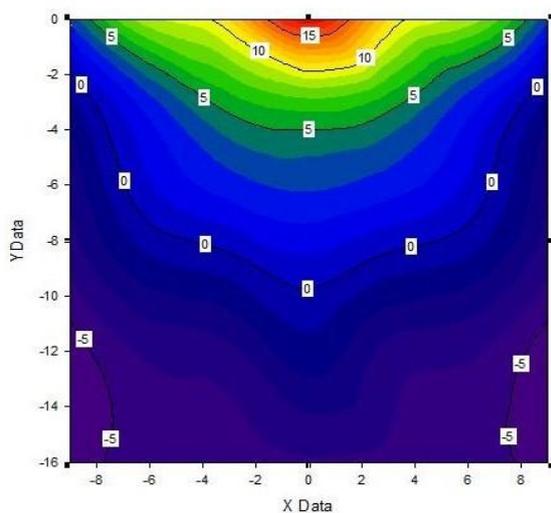


Рисунок 6 - Температурное поле грунта через $t = 4.5$ часа после включения подогрева.

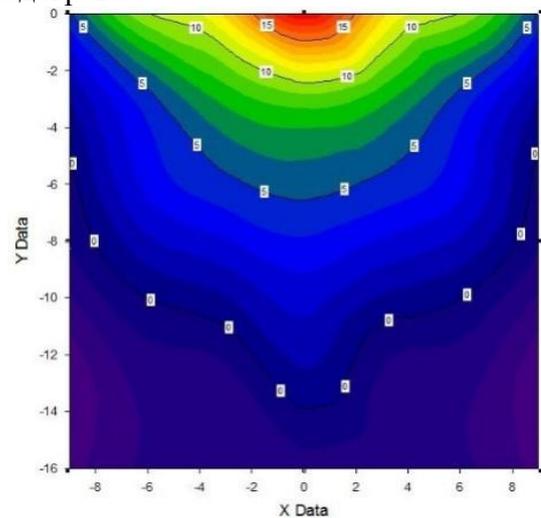


Рисунок 7 - Температурное поле грунта через $t = 9$ часов после включения подогрева.

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.

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.

Третья глава посвящена описанию методики определения температур газового пространства и горячей жидкости в резервуаре с течением времени.

При любом тепловом расчете основополагающим уравнением является уравнение теплового баланса

$$G \cdot \rho \cdot c \cdot (T_{cp} - T) dt - k_t \cdot S \cdot (T - T_0) dt = (V_0 \cdot \rho \cdot c + G \cdot t \cdot \rho \cdot c + m_0 c_0) dT, \quad (1)$$

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

Преобразуем уравнение (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; $k = \frac{k_t S}{G \cdot \rho \cdot c}$

- 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.

После преобразования уравнение (1) имеет вид

$$\frac{dT}{T_{cp} - T - k \cdot (T - T_0)} = \frac{d\tau}{\tau' + \tau + 1}. \quad (2)$$

После интегрирования закон изменения температуры во время заполнения резервуара в зависимости от производительности насоса и времени заполнения выглядит следующим образом

$$T = \frac{T_{cp} + k \cdot T_0}{k + 1} - \frac{(T_{cp} + k \cdot T_0 - T_k \cdot (k + 1))}{(k + 1) \cdot (1 + \tau + \tau')^{k+1}}. \quad (3)$$

Уравнение (3) позволяет определить температуру теплоносителя в любой момент времени в процессе закачки 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.

Закон изменения температуры теплоносителя при заполнении пустого резервуара имеет вид:

$$T = \frac{T_{cp} + k \cdot T_0}{k + 1} - \frac{T_{cp} - T_0}{(k + 1) \cdot (1 + \tau)^{k+1}} \quad (4)$$

Процесс охлаждения теплоносителя при эксплуатации резервуара (выстаивание) может быть описан, исходя из уравнения теплового баланса (1), составленного для заполненного резервуара:

$$-k_t \cdot S \cdot (T - T_0) dt = (Q_0 \cdot \rho \cdot c + m_0 \cdot c_0) dT \quad (5)$$

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

$$T = T_0 + (T_n - T_0) e^{-\frac{t'}{k'}} \quad (6)$$

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

$$k' = \frac{Q_0 \cdot \rho \cdot c + m_0 \cdot c_0}{k_t \cdot S} = \frac{t' + t_0}{k}$$

Уравнение (6) представляет собой выражение, аналогичное 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.

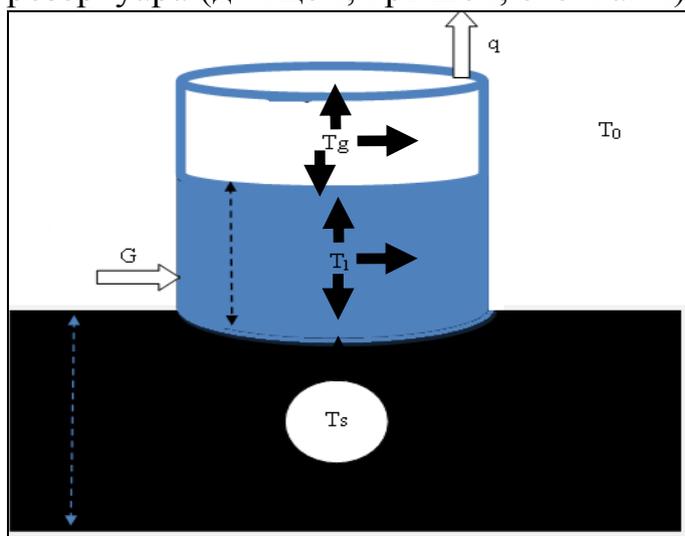


Рисунок 8 - Схема теплообмена резервуара с окружающей средой: индексы g, l, s , обозначают соответственно, газовую, жидкую и грунтовую составляющие системы

На рисунке 8 представлена схема передачи тепла от горячего теплоносителя в окружающую среду через ограждающую конструкцию резервуара. Для резервуара значение коэффициента теплопередачи k_t должно быть вычислено с учетом характера теплопередачи через ограждающую конструкцию резервуара:

$$k_t = \frac{\kappa_{дн} \cdot S_{дн} + \kappa_{ст.г.} \cdot S_{ст.г.} + \kappa_{ст.ж.} \cdot S_{ст.ж.} + \dots}{S}$$

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, Вт/м²·°С.

Коэффициент теплопередачи через днище определяем по формуле:

$$k_{\text{дн}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1\text{дн}}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{\pi \cdot \delta_{\text{гр}}}{8\lambda_{\text{зр}}}}, \quad (7)$$

где δ_i [м] и λ_i [Вт/м·К] – толщина и теплопроводность, соответственно, стальной стенки днища резервуара, изоляции и т.д.; $\alpha_{1\text{дн}}$ – коэффициент теплообмена от теплоносителя к внутренней стенке днища емкости, Вт/м²·К.

Коэффициент теплопередачи через стенку в области газового пространства находим по формуле:

$$k_{\text{ст.г.}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1\text{ст.г.}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_{2\text{ст.г.}} + \alpha_{3\text{ст.г.}} + \alpha_{4\text{ст.г.}}}}, \quad (8)$$

где $\alpha_{1\text{ст.г.}}$ – коэффициент теплообмена от газовой смеси к вертикальной стенке емкости; $\alpha_{2\text{ст.г.}}, \alpha_{3\text{ст.г.}}, \alpha_{4\text{ст.г.}}$ – коэффициенты теплообмена от стенки резервуара к окружающей среде за счет вынужденной и свободной конвекции, излучения.

Коэффициент теплопередачи через стенку в области жидкости:

$$k_{\text{ст.ж.}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1\text{ст.ж.}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_{2\text{ст.ж.}} + \alpha_{3\text{ст.ж.}}}}, \quad (9)$$

где $\alpha_{1\text{ст.ж.}}$ – коэффициент теплообмена от теплоносителя к вертикальной стенке резервуара за счет вынужденной конвекции, создаваемой потоком теплоносителя; $\alpha_{2,3\text{ст.ж.}}$ – коэффициенты теплообмена окружающей среды.

Коэффициент теплопередачи через кровлю находится по формуле:

$$k_{\text{кр}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1\text{кр}}} + \frac{\delta_{\text{кр}}}{\lambda_{\text{кр}}} + \frac{h_{\text{газ.пр}}}{\lambda_{\text{экр}}} + \frac{1}{\alpha_{2\text{кр}} + \alpha_{3\text{кр}}}}, \quad (10)$$

где $\alpha_{1\text{кр}}$ – коэффициент теплообмена от «зеркала» теплоносителя в газовое пространство резервуара за счет свободной конвекции, Вт/м²·К; $\lambda_{\text{экр}}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности газовой смеси, Вт/м·К; $h_{\text{газ.пр}}$ – полная высота газового пространства, м.

Коэффициенты теплообмена $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ определяются в соответствии с видом конвекции по известным критериальным уравнениям.

Согласно формулам 6-10 можно оценить в зависимости от режима работы резервуара тепловые потоки через ограждающую конструкцию.

Четвертая глава посвящена приближенному квазистационарному аналитическому решению задачи Стефана с конвективной составляющей. Уравнение для задачи о протаивании грунта (двумерной задачи Стефана (Stefan) в цилиндрических координатах r, x в классической постановке без учета конвекции) имеет вид:

$$\frac{\partial T_{1,2}}{\partial t} = a_{1,2} \frac{\partial^2 T_{1,2}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{1,2}}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{1,2}}{\partial x^2} . \quad (11)$$

Талая и мерзлая 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_{in} . Граничные условия на неподвижных границах имеют вид:

$$T_1 \Big|_{x=0} = T_0, \quad \frac{\partial T_{1,2}}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad T_2 \Big|_{r \rightarrow \infty, x \rightarrow \infty} \rightarrow T_{in}.$$

Температуру поверхности грунта в области соприкосновения с дном резервуара T_0 будем считать равной температуре нефти, циркулирующей в нем. В наших экспериментах $T_{in} = -8$ °С, $T_0 = 33$ °С. На фронте плавления задано равенство температур $T_1 = T_2 = 0$ °С, а также условие баланса энергии, которое часто называют условием Стефана:

$$\lambda_1 \text{grad} T_1 - \lambda_2 \text{grad} T_2 \Big|_{F=0} = L \frac{\partial F}{\partial t} \frac{\partial t}{\text{grad} F}. \quad (12)$$

Точного аналитического решения данная задача не имеет. Будем искать приближенное решение уравнения (11) в виде $T(F)$, где $F = \text{const}$ – уравнение изотермической поверхности; в частности, $F = 0$ – уравнение нулевой изотермы. Функцию F будем искать в виде:

$$F = x - f(r) - z(t), \quad z(t) = \int_0^t g(t) dt. \quad (13)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial r} &= -T' \cdot f', \\ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} &= f'^2 \cdot T'' - T' \cdot f'', \\ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} &= T'', \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= -g \cdot T', \end{aligned} \quad (14)$$

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

Подставляя (14) в (11) и пренебрегая различием между a_1 и a_2 (т.е. считаем $a_1 \approx a_2 \approx a$), получаем обыкновенное дифференциальное уравнение относительно функции $f(r)$:

$$B^2 (1 + f'^2) - f'' - \frac{1}{r} f' + \frac{g}{a} = 0, \quad (15)$$

$$\text{где } B^2 = T''/T'. \quad (16)$$

Для уравнения (15) может быть получено аналитическое решение, если считать величины g и B^2 константами. Такое решение описывает движение фронта плавления с постоянной скоростью. Для рассматриваемой задачи для всего процесса прогрева данное предположение неприемлемо. Однако можно разбить процесс прогрева на достаточно короткие интервалы времени Δt , вну-

три которых считать скорость g постоянной. Далее, подставляя градиенты найденных таким образом температур в условие Стефана (12), найти изменение координаты фронта $\Delta z(t)$, и, таким образом, найти $z(t)$ по шагам. Физически данное допущение означает, что фронт плавления движется настолько медленно, что можно считать температурное поле мало отличающимся от стационарного (квазистационарное приближение):

$$\Delta z \ll \overline{a\Delta t}, \text{ или } \Delta t \ll a/g^2. \quad (17)$$

Вводя обозначения

$$B^2 + g/a = A^2, \quad y = ABr, \quad f' = -w' y / B^2 w y,$$

преобразуем уравнение (15) к виду:

$$w'' + \frac{1}{y} w' + w = 0, \quad (18)$$

решением которого является функция Бесселя (Bessel) первого рода нулевого порядка $J_0(y)$.

Возвращаясь к прежним обозначениям, и учитывая очевидное требование $f'_{r=0} = 0$, получаем решение для функции $f(r)$:

$$f r = -\frac{1}{B^2} \ln J_0(ABr). \quad (19)$$

Очевидно, полученное решение имеет смысл, если

$$ABr < 2.4, \quad (20)$$

где 2.4 – первый нуль функции Бесселя J_0 .

Обозначим радиус прогретой области через R , и, полагая $ABR = 2.4$, из определения величины A находим:

$$g = a \frac{2.4}{BR}^2 - aB^2. \quad (21)$$

С другой стороны, интегрируя (16), с учетом граничных условий, находим:

$$T'_1 = \frac{B^2 T_0 \exp B^2 F}{\exp -B^2 z - 1}, \quad T_1 = T_0 \frac{\exp B^2 F - 1}{\exp -B^2 z - 1}, \quad (22)$$

$$T'_2 = -B^2 T_{in} e^{-B^2 F}, \quad T_2 = T_{in} (1 - e^{-B^2 F}).$$

Подставляя в условие (12), получаем второе соотношение между g и B^2 :

$$g = \frac{B^2}{L} \frac{\lambda_1 T_0}{\exp -B^2 z - 1} - \lambda_2 T_{in}. \quad (23)$$

Приравнивая правые части уравнений (21) и (23), получаем трансцендентное уравнение относительно величины B^2 . С его помощью, разбивая процесс прогрева на интервалы времени Δt , удовлетворяющие условию (17), и используя экспериментальные значения z , R и T_0 , находим B^2 , g , и расчетные значения z . Однако найденная таким образом скорость движения фронта существенно оказывается существенно ниже экспериментальной, что

подтверждает предположение о возникновении конвективного переноса тепла.

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:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_{r,t} \frac{\partial T}{\partial x} = a \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} . \quad (24)$$

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

$$F = x - f(r) - h(r) \int_0^t g(t) dt = x - f(r) - h(r) \cdot z(t), \quad v_{r,t} = g(t) \cdot h(r), \quad (25)$$

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 (24), получаем дифференциальное уравнение для функции $h(r)$:

$$B^2 \left(1 + f' + h'z \right)^2 - f'' + h''z - \frac{1}{r} f' + h'z = 0, \quad (26)$$

где B^2 , как и выше, определяется формулой (16).

Выполняя замену $y = B^2 \cdot r$,

$$f' + h'z = -u' / (B^2 u), \quad (27)$$

получаем уравнение для функции u :

$$\frac{d^2 u}{dy^2} + \frac{1}{y} \frac{du}{dy} + u = 0, \quad (28)$$

совпадающее по форме с уравнением (18).

Решением этого уравнения является функция Бесселя $u = J_0 y = J_0 B^2 r$, а $u' = -B^2 \cdot J_1 B^2 r$.

Из уравнения (27) находим:

$$h' r = -\frac{1}{z} \frac{u'}{B^2 u} + f' = \frac{1}{z} \frac{J_1 B^2 r}{J_0 B^2 r} - \frac{AJ_1}{BJ_0} \frac{ABr}{ABr} . \quad (29)$$

Интегрируя по r в области положительных значений правой части уравнения (29), получаем:

$$h r = \frac{1}{zB^2} h_0 - \ln \frac{J_0 B^2 r}{J_0 ABr} . \quad (30)$$

Константа интегрирования h_0 должна быть выбрана так, чтобы ликвидировать разницу между расчетными и экспериментальными значениями $z(t)$. Результат расчетов представлен на рисунке 9 в виде функции $F(r,x,t)=0$ в различные моменты времени t , а также на рисунке 10 в виде зависимости координаты центра фронта от времени. Видно, что учет конвективного переноса тепла позволяет достичь удовлетворительного согласия с экспериментальными данными.

Как видно из рисунка 9, расстояние между изотермами 0°C и $+4^\circ\text{C}$ вблизи

оси $r = 0$ равно $\Delta z \approx 2$ см. Именно в этой области, с учетом отрицательного значения коэффициента объемного расширения воды $\beta_T \approx -6.4 \cdot 10^{-5}$ 1/К, возможно возникновение конвекции при нагреве сверху.

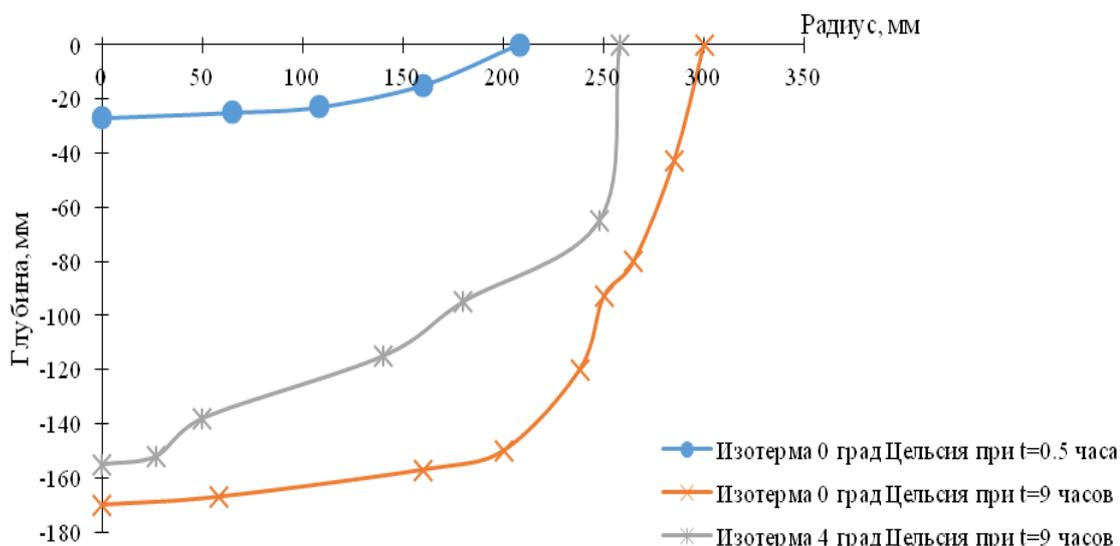


Рисунок 9 - Ореол оттаивания мерзлого грунта под горячим резервуаром

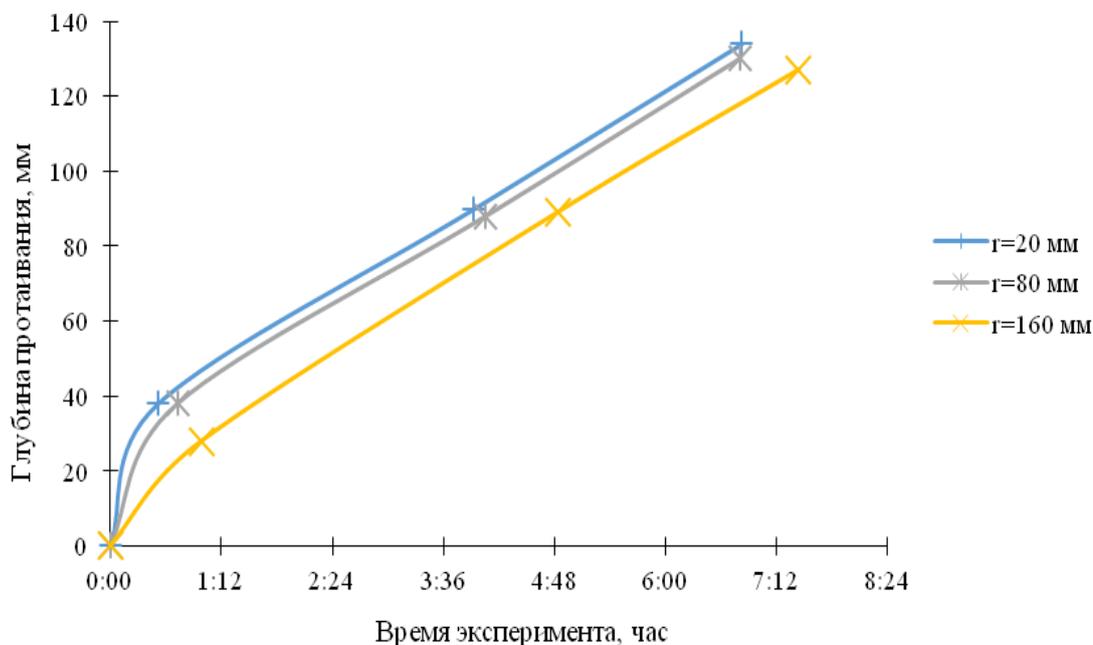


Рисунок 10 - Движение фронта протаивания в мерзлом грунте при различном радиусе

Обозначив через перепад температур $\Delta T = 4$ К, 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.

Оценивая из данных таблицы 3 по формуле (25) значение средней проекции скорости талой воды на вертикальную ось $r = 0$, находим в конце прогрева $v \approx 2 \cdot 10^{-6}$ 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.

В пятой главе описана физико-математическая модель тепломассопереноса системы «горячий резервуар – основание – мерзлый грунт» и приведено подробное описание процесса моделирования, а также полученные результаты численного моделирования, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными. Также в главе 5 проведено исследование по определению основополагающих и особо значимых параметров, которые оказывают существенное влияние на процесс тепломассопереноса в системе «горячий резервуар – основание - мерзлый грунт».

Компьютерное моделирование данной проблемы рассмотрено несколькими авторами [Ваганова Н.А., Башуров В.В., Гишкелюк, И. А.], которые подтверждают вывод, полученный экспериментально автором, что движение жидкости в грунте создает дополнительный термальный поток, который необходимо учитывать при решении уравнения теплопроводности. В малообводненных грунтах этим механизмом можно пренебречь, что не относится к грунтам на севере России, по которым проходят большинство действующих и строящихся трубопроводов, объектов ТЭК.

Физико-математическое 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 свободной поровой влаги.

Нестационарная теплофизическая модель представлена в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_g = -Q_{g1} + Q_{go1} + Q_{go2} - Q_l \\ Q_l = Q_{l1} + Q_{lo} + Q_{ls} + Q_{lg} \\ \frac{\partial T_s}{\partial t} = a_s \cdot \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left(r \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right) + \mathcal{G}_r \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r} + \mathcal{G}_z \left(\frac{\partial T_s}{\partial z} \right), \\ \mathcal{G}_r = -K \cdot \frac{\partial w}{\partial r}, \mathcal{G}_z = -K \cdot \frac{\partial w}{\partial z} \\ G = \pi R^2 \cdot \frac{dh}{dt} \end{array} \right. \quad (31)$$

$$\begin{aligned}
Q_g &= C_g \cdot \rho_g \cdot \pi R^2 \cdot \frac{d(H-h)}{dt}; & Q_l &= C_l \cdot \rho_l \cdot \pi R^2 \cdot \frac{d(T_l - T_0)}{dt}; \\
Q_{g1} &= C_g \cdot \rho_g \cdot \pi R^2 \cdot (T_g - T_0) \cdot \frac{d(H-h)}{dt}; & Q_{l1} &= C_l \cdot \rho_l \cdot \pi R^2 \cdot (T_{lo} - T_l) \cdot \frac{d\phi}{dt}; \\
Q_{go1} &= k_{go1} \cdot (T_g - T_0) \cdot \pi R^2; & Q_{lo} &= k_{lo} \cdot (T_l - T_0) \cdot 2\pi R h \\
Q_{go2} &= k_{go2} \cdot (T_g - T_0) \cdot 2\pi R \cdot (H-h); & Q_{ls} &= k_{ls} \cdot (T_l - T_s) \cdot \pi R^2 \\
Q_l &= \alpha_{gl} \cdot (T_g - T_l) \cdot \pi R^2 & Q_{lg} &= \alpha_{lg} \cdot (T_l - T_g) \cdot \pi R^2
\end{aligned}$$

где T_0 - температура окружающей среды, К; T_{lo} - температура теплоносителя на входе в резервуар при постоянном расходе G , К; k_{go1} , k_{go2} , k_{lo} , k_{ls} - коэффициенты теплопередачи, соответственно, через кровлю, боковую стенку резервуара в области газового, в области жидкого пространств, через днище Вт/(м²·К); α_{gl} и α_{lg} - коэффициент теплообмена от газовой смеси к «горячему» теплоносителю и обратно, Вт/(м²·К); $C_{g,l,s}$ и $\rho_{g,l,s}$ - теплоемкость и плотность газовой смеси, теплоносителя и грунта, соответственно, Дж/(м³·К), м; R , H - радиус и высота резервуара, м; h - высота налива теплоносителя, м; G - расход теплоносителя, м³/с, a_s - коэффициент температуропроводности грунта, м²/с, \mathcal{G}_r и \mathcal{G}_z - скорость фильтрации поровой влаги, K - изотермический коэффициент влажпроводности, м/с², w - весовая влажность.

Система (31) решается с использованием неявной схемы со следующими начальными и граничными условиями:

<p>Начальные условия:</p> <p>при $t = 0$ $h = 0$,</p> <p>$T_g = T_0$, $T_l = T_{lo}$,</p> <p>$J = k_{ls} \cdot (T_l - T_s) \cdot \pi R^2 = 0$</p> <p>на $z = 0$ $T_s = T_0$</p>	<p>Граничные условия:</p> <p>$z > 0, T_s = T_0$</p> <p>$z = L, T_s = T_{lo} = const$</p> <p>$J = k_{ls} \cdot \pi R^2 \cdot (T_l - T_s) = \lambda \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big _{z=0}$</p>
--	--

По результатам численного решения и экспериментального исследования на рисунке 11 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 хорошее совпадение с экспериментальными данными нежели без ее учета.

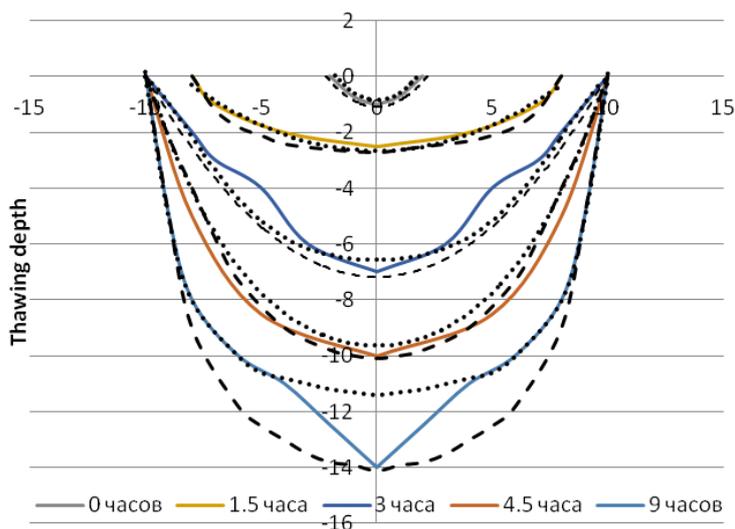


Рисунок 11 Динамика фронта протаивания мерзлого грунта.
 — (сплошная линия) — экспериментальные значения.
 ---- (пунктирная линия) — численное решение с учетом конвекции;
 ** - численное решение без учета конвекции.

Предложенная модель может быть использована для расчета температурного режима мерзлых грунтов в естественных условиях, что позволит спрогнозировать процессы, происходящие в мерзлой породе.

Описанная модель может быть адаптирована для прогнозирования тепловлажностного состояния многолетнемерзлых грунтов – оснований для прочих инженерных конструкций, например, трубопроводов, зданий, объектов топливно-энергетического комплекса.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

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 теплопереноса 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 теплопереноса системы «горячий резервуар - основание - мерзлый грунт», учитывающая миграцию поровой влаги. Результаты численного решения хорошо согласуются с экспериментальными данными и с приближенным аналитическим решением.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Шастунова У.Ю. Тепловой режим гидравлических испытаний резервуара вертикального стального объемом 20000 м³ / Г.В. Бахмат, А.А. Кислицын, У.Ю. Шастунова // Вестник Тюменского государственного университета. - 2011. - №7. - с.64-72.
2. Шастунова У.Ю. Экспериментальное и теоретическое исследование процесса протаивания мерзлого грунта под резервуаром для хранения нефтепродуктов / У. Ю. Шастунова, А. А. Кислицын // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. - 2015. - Т. 1, № 6. - С. 15-25.
3. Shastunova U. Termal interference of engineering construction with permafrost ground as bottom / U. Shastunova, P. Michailov // International Science Conference SPbWOSCE-2016 “SMART City” St. Petersburg, Russia. - 2016. - №1. - 02018 (MATEC Web of Conferences.2017.106.02018)
4. 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.
5. 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.– 507-514.
6. 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: Materials Science and Engineering 357(1) (2018) 012007

Публикации в других изданиях

7. 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.
8. 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.
9. Шастунова У.Ю. Расчет системы охлаждения мерзлого грунта под резервуаром с мазутом / У. Ю. Шастунова, Ю.Ф. Янбикова // Достижения и пробле-

мы современной науки: сборник статей Международной научно-практической конференции. - 2015. - Вып. часть 1. - С. 48-54.

10. 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.

11. 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.

12. Шастунова У.Ю. Исследование температурного режима резервуара с нефтепродуктами в зимнее время / У. Ю. Шастунова, Д.А. Дмитриевская // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. - 2016. – Т. 2, №1. - С. 26-33.

13. Шастунова У.Ю. Расчетно-экспериментальное исследование процессов протаивания и систем термостабилизации мерзлого грунта под резервуаром для отстаивания нефти / У. Ю. Шастунова, Ю.Ф. Янбикова // Сборник статей IX школы-семинара молодых ученых «Теплофизика, гидрогазодинамика, теплотехника. Инновационные технологии». Тюмень: 2016. – с. 191-199.