

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 Д 212.274.10 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 « ___ » _____ 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 теплотехнического 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 «Фундаментстройаркос» (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 2 статьях, входящих в перечень ВАК, и 3 публикациях в изданиях, входящих в международные базы данных. Их список приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы. Материал изложен на 152 страницах, включает 44 рисунка, 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. 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 |

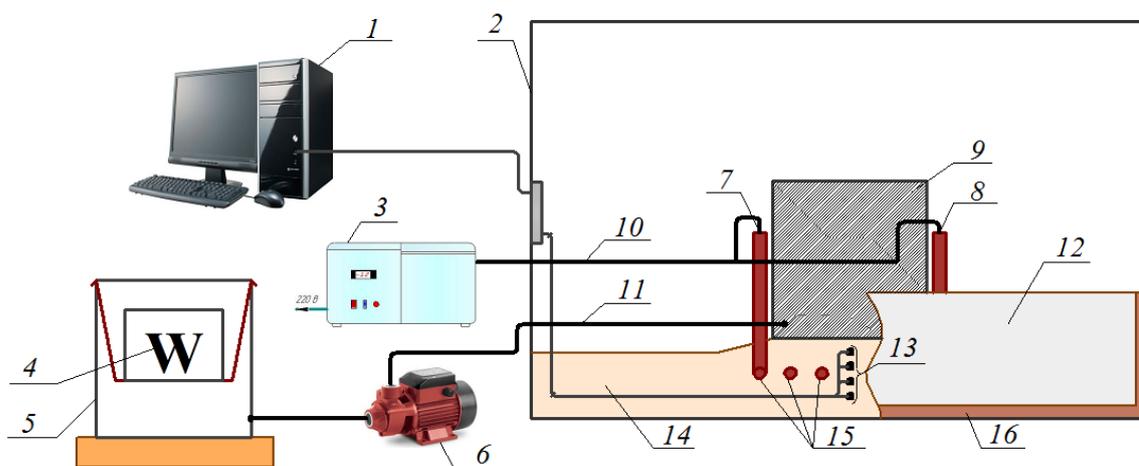


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки: 1 – персональный компьютер; 2 – климатическая камера 2250x1600x2000 мм; 3 – криостат; 4 – нагревательный элемент; 5 – емкость для нагрева нефти; 6 – насос; 7 – вход в систему охлаждающих труб; 8 – выход из системы охлаждающих труб; 9 – модель резервуара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

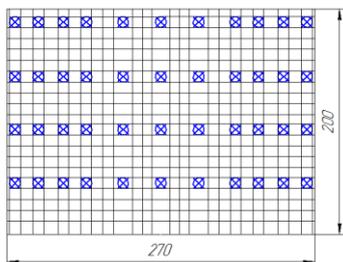


Рисунок 2 – Схема расположения температурных датчиков

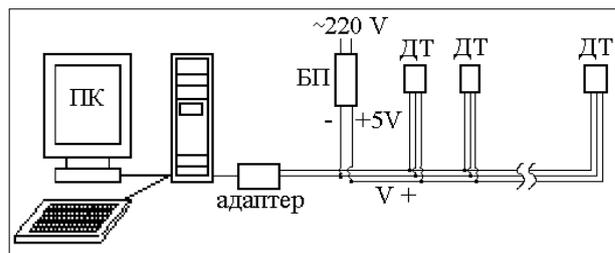


Рисунок 3 - Схема подключения датчиков температуры к персональному компьютеру. ПК – персональный компьютер; БП – блок питания; ДТ – датчики температуры.

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 завершён.

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 растёт, 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.

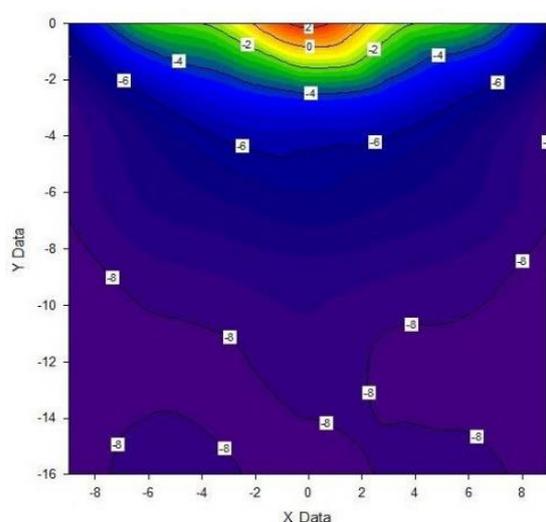


Рисунок 4 - Температурное поле грунта через $t = 10$ минут после включения подогрева.

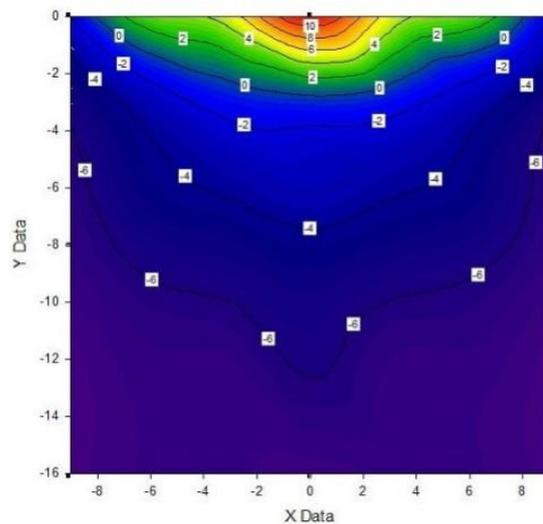


Рисунок 5 - Температурное поле грунта через $t = 1.5$ часа после включения подогрева.

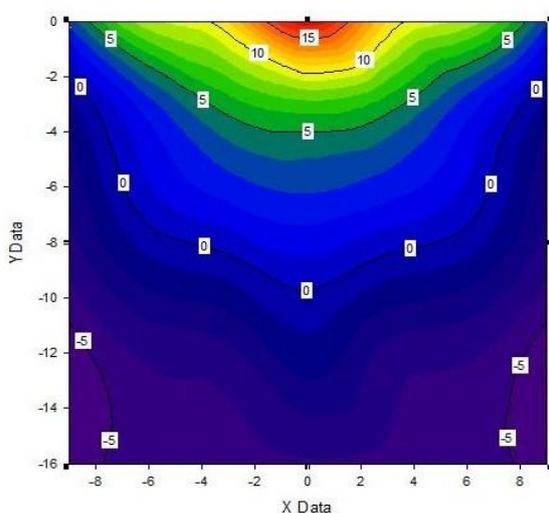


Рисунок 6 - Температурное поле грунта через $t = 4.5$ часа после включения подогрева.

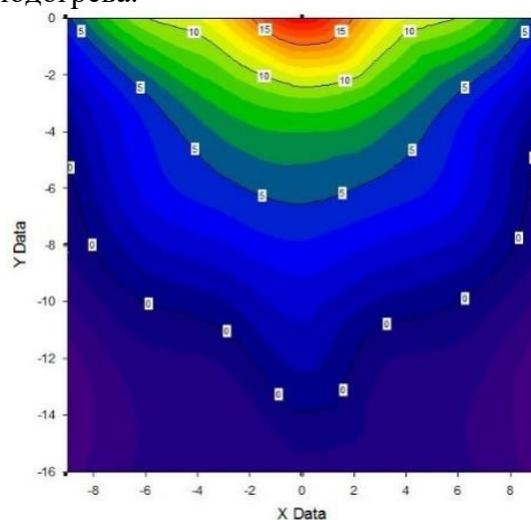


Рисунок 7 - Температурное поле грунта через $t = 9$ часов после включения подогрева.

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

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

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

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

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:

$$-k_t \cdot S \cdot (T - T_0) \cdot dt = (V_0 \cdot \rho \cdot c + m_0 \cdot c_0) \cdot dT \quad (5)$$

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

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

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

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

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.

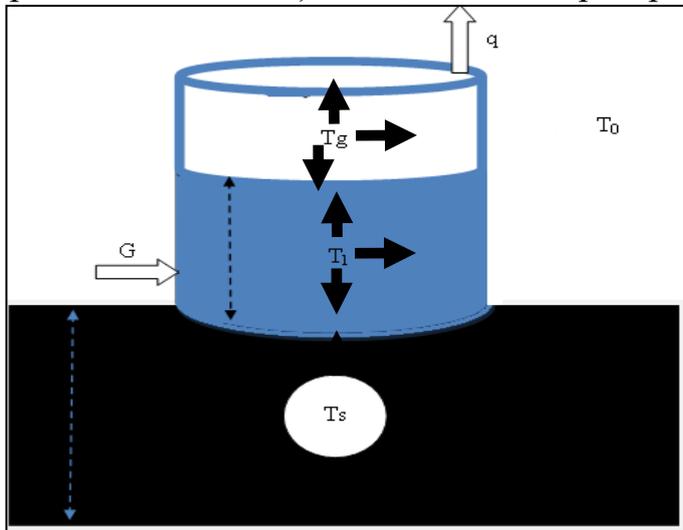


Рисунок 8 - Схема теплообмена резервуара с окружающей средой: индексы g, l, s , обозначают соответственно, газовую, жидкую и грунтовую составляющие системы

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:

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

где $k_{дн}, k_{ст.г.}, k_{ст.ж.}, k_{кр}$ - коэффициенты теплопередачи через днище, стенку

в области газового и жидкого пространства, кровли резервуара, Вт/м²·°С.

Коэффициент теплопередачи через днище определяем по формуле:

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

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:

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

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:

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

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 α_1 , α_2 , α_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:

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

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:

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

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:

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

Точного аналитического решения данная задача не имеет. Будем искать приближенное решение уравнения (11) в виде $T(F)$, где $F = const$ – 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 , внутри 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):

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

Вводя обозначения

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

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:

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

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 :

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

Приравнявая 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:

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

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 $h(r)$:

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

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:

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

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

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

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.

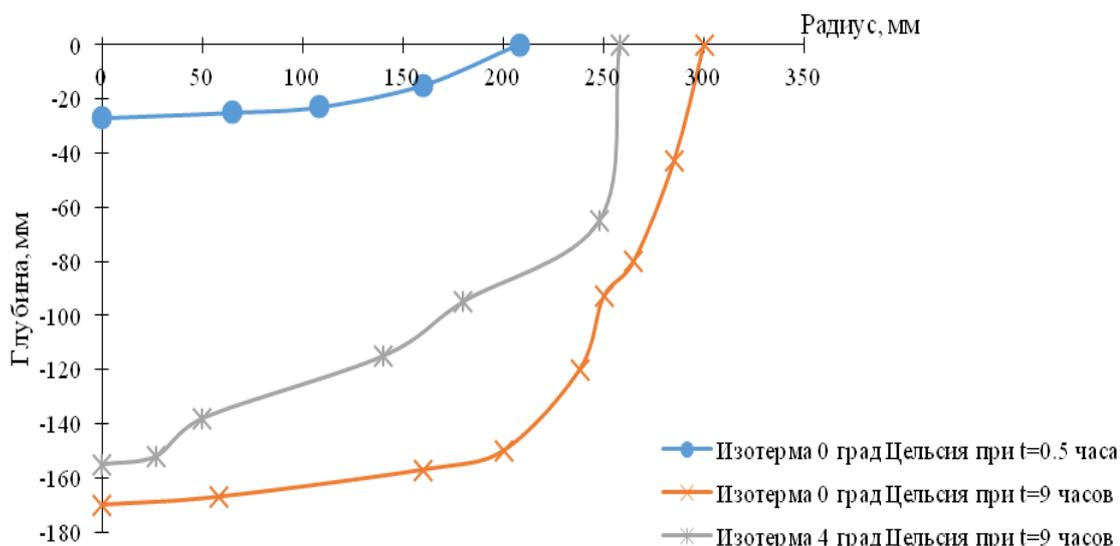


Рисунок 9 - Ореол оттаивания мерзлого грунта под горячим резервуаром

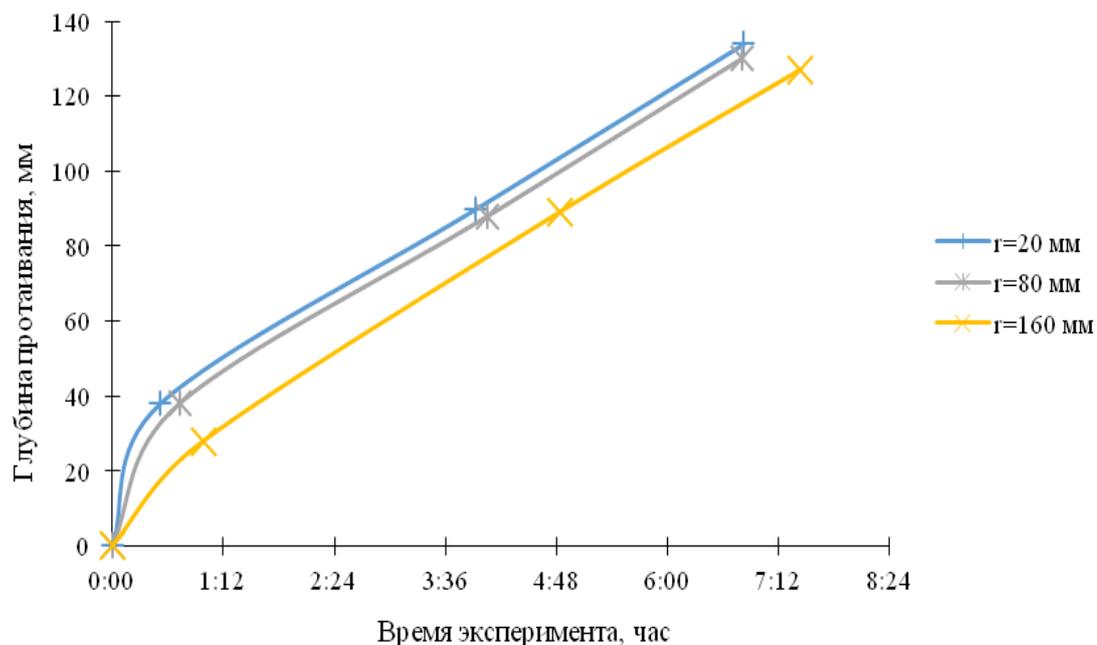


Рисунок 10 - Движение фронта протаивания в мерзлом грунте при различном радиусе

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 экспериментальных данных 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:

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

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

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/(кг·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{Q}_r и \mathcal{Q}_z - скорость фильтрации поровой влаги, К - изотермический коэффициент влажностепроводности, 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>$z > 0, T_s = T_s(z)$</p> <p>$z = L, T_s = T(L) = const$</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.

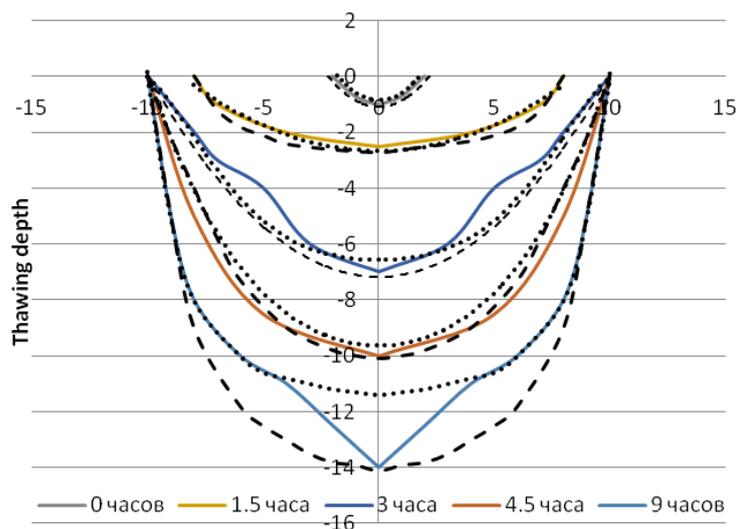


Рисунок 11 Динамика фронта протаивания мерзлого грунта.
 — (сплошная линия) — экспериментальные значения.
 ---- (пунктирная линия) — численное решение с учетом конвекции;
 ** - численное решение без учета конвекции.

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

Наиболее значимые публикации

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 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.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных

3. 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.
4. Shastunova U. Termal 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) (*Web of Science, Scopus*).
5. 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 (*Scopus*).

Публикации в других изданиях

6. 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» – Тюмень: «Сити-Пресс», 2011. - С. 225-229.
7. 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» – Тюмень: «Сити-Пресс», 2011. - С. 301-306.
8. 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.
9. 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 – Уфа, 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 – Вологда, 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.