

На правах рукописи



Половников Вячеслав Юрьевич

**РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ
СИСТЕМ ТРАНСПОРТИРОВКИ И ХРАНЕНИЯ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном автономном
образовательном учреждении высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный консультант:

Кузнецов Гений Владимирович

доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Скуратов Александр Петрович,

доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», кафедра теплотехники и гидрогазодинамики, профессор, г. Красноярск

Ахметова Ирина Гареевна,

доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», проректор по научной работе, г. Казань

Таиров Эмир Асгадович,

доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, отдел теплосиловых систем №70, главный научный сотрудник, г. Иркутск

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь

Защита состоится «19» февраля 2021 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.02 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru

Автореферат разослан «___» _____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.173.02



Боруш О. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Энергетическая стратегия и программы повышения энергоэффективности промышленности и сельского хозяйства регионов РФ связаны с энергосбережением в различных отраслях. Одной из них является энергоснабжение.

Известно, что в России потери тепловой энергии при транспортировке и хранении составляют от 15 до 40 %, в то время как в развитых энергетических центрах мира не превышают 4–6 %. Существенно снизить масштабы потерь тепловой энергии при транспортировке и хранении можно только используя современные научно-обоснованные подходы к энергосберегающим мероприятиям в этих системах.

Экспериментальному и теоретическому исследованию закономерностей тепло-массопереноса в тепловой защите теплопроводов тепловых сетей, холодопроводов, резервуаров для хранения мазута и сжиженных природных газов (СПГ) посвящены работы Шубина Е.П., Петрова-Денисова В.Г., Иванова В.В., Шойхета Б.М., Каганера М.Г., Витальева В.П., Соколова Е.Я., Назмеева Ю.Г., Дубницкого В.И., Фурмана А. В., Сандера А.А., Моисеева Б.В. и др. На базе работ этих исследователей разработаны действующие в настоящее время нормативные методики оценки потерь теплоты и холода рассматриваемых объектов. Однако эти правила по проектированию тепловой изоляции основаны на упрощенных подходах к анализу тепловых режимов систем транспортировки и хранения энергоносителей и не соответствуют современному уровню развития прогностического моделирования.

Учет комплекса основных взаимосвязанных факторов и процессов, оказывающих существенное влияние на уровень потерь тепла, позволит на стадии проектирования и реконструкции систем транспортировки и хранения энергоносителей минимизировать тепловые потери и продолжительности переходных процессов, и, следовательно, повысить энергоэффективность рассматриваемых объектов. Поэтому, разработка теоретической базы для повышения эффективности тепловой защиты систем транспортировки и хранения энергоносителей является **актуальной**, и относится к критической технологии РФ-26 – «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии»; приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в РФ-8 – «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» и входит в перечень приоритетных направлений модернизации и технологического развития экономики РФ-1 – «Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива».

Степень разработанности: в настоящее время имеется достаточно большая база данных в технической литературе по энергосберегающим технологиям в энергетике. Однако, применительно к системам транспортировки и хранения энергоносителей, они ограничиваются предложениями по применению новых теплоизоляционных материалов и изменению вариантов размещения элементов рассматриваемых систем, например, перенос тепловых сетей из подземного исполнения в надземное.

В диссертации обобщены основные закономерности тепло-массопереноса в тепловой защите систем транспортировки и хранения энергоносителей с учетом всех основных факторов и процессов, приводящих к интенсификации процессов переноса, сгруппированы физические и прогностические математические модели для описания этих процессов, установлены интегральные характеристики и влияние на последние основных параметров рассматриваемых систем (температура энергоносителя, температура и влажность окружающей среды, теплофизические характеристи-

ки изоляционных конструкций, материалов и грунтов в местах размещения элементов рассматриваемых систем, влияние определяющих механизмов тепломассопереноса и многие другие).

Данные о процессах тепломассопереноса в тепловой защите систем транспортировки и хранения энергоносителей, полученные в настоящей работе, являются необходимыми для создания научных основ методик анализа и оценки их тепловых потерь и тепловых режимов.

Цель – решение научной проблемы тепловой защиты систем транспортировки и хранения энергоносителей с разработкой нового подхода к моделированию тепловых режимов и методик анализа их тепловых потерь.

Основные **задачи** для достижения сформулированной цели:

1. Разработать новый подход к анализу тепломассопереноса в тепловой защите систем транспортировки и хранения энергоносителей (тепло- и холодопроводы, хранилища топлив и СПГ) заключающийся в использовании моделей математической физики и учете основных факторов и процессов, влияющих на интенсификацию процессов переноса в рассматриваемых системах.

2. Провести анализ влияния основных значимых факторов и процессов на интенсификацию тепломассопереноса в тепловой защите систем транспортировки и хранения энергоносителей.

3. Разработать комплексные методики численного анализа тепловых режимов и тепловых потерь систем транспортировки и хранения энергоносителей, эксплуатируемых в условиях увлажнения тепловой изоляции с учетом нестационарности процессов тепломассопереноса, фазовых переходов и взаимодействия с окружающей средой.

4. Усовершенствовать методики оценки тепловых потерь элементов теплопроводов тепловых сетей, учитывающие полный спектр возможных условий эксплуатации и факторов, приводящих к росту тепловых потерь (наличие конвективного движения среды в полостях каналов теплопроводов, нестационарность процессов переноса, дефекты теплозащитных покрытий, наличие дополнительных термических сопротивлений, взаимодействие с окружающей средой).

5. Усовершенствовать методики численного анализа тепловых потерь резервуаров для хранения топлив и СПГ с учетом взаимодействия с окружающей средой.

6. Провести экспериментальные исследования тепловых потерь теплопроводов в условиях увлажнения изоляции и коэффициентов водонепроницаемости ряда современных теплоизоляционных материалов.

7. Разработать рекомендации по совершенствованию методик анализа тепловых режимов тепловой защиты систем транспортировки и хранения энергоносителей.

Научная новизна:

1. Разработан новый подход к анализу тепломассопереноса в тепловой защите систем транспортировки и хранения энергоносителей заключающийся в использовании моделей математической физики и учете основных факторов и процессов, влияющих на интенсификацию процессов переноса в рассматриваемых системах.

2. Выполнен анализ влияния основных значимых факторов и процессов на интенсификацию тепломассопереноса в тепловой защите систем транспортировки и хранения энергоносителей.

3. Разработаны новые методики анализа тепловых режимов тепловой защиты систем транспортировки и хранения энергоносителей (тепловых потерь теплопроводов и резервуаров для хранения СПГ, эксплуатируемых в условиях увлажнения

тепловой изоляции; тепловых потерь канальных и бесканальных теплопроводов; потерь тепла резервуаров для хранения топлив и СПГ; усталостных напряжений, возникающих в структуре тепловой и низкотемпературной изоляции) с учетом основных факторов и процессов, приводящих к интенсификации тепломассопереноса в рассматриваемых системах.

4. Впервые проведены экспериментальные исследования тепловых потерь теплопроводов в условиях увлажнения изоляции и ее последующей сушки, коэффициентов водопроницаемости ряда теплоизоляционных материалов.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Практическая значимость результатов исследований заключается в том, что они позволяют, в первую очередь, на существенно более высоком уровне проводить опытно-конструкторские работы в сфере энергосберегающих технологий при проектировании, реконструкции или модернизации систем транспортировки и хранения энергоносителей. В диссертации проведено научное обоснование возможности минимизации тепловых потерь и продолжительности переходных процессов тепло- и массопереноса в условиях реальной эксплуатации энергосберегающих систем транспортировки и хранения энергоносителей.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что предлагается новый подход к исследованию тепловых режимов систем транспортировки и хранения энергоносителей, основанный на прогностических математических моделях тепломассопереноса в условиях фазовых превращений, учитывающий влияние основных значимых процессов и факторов, приводящих к росту потерь тепловой энергии.

Методы исследования.

При проведении численного моделирования взаимосвязанных процессов сопряженного тепломассопереноса с учетом фазовых переходов и взаимодействия с окружающей средой использованы методы решения дифференциальных уравнений в частных производных (конечных элементов; конечных разностей, локально-одномерный, переменных направлений, прогонки, итераций, ловли фронта в узел пространственной сетки). Алгоритмы решения систем нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных с начальными и граничными условиями реализованы с использованием неравномерных пространственных разностных сеток и процедуры проверки закона сохранения энергии в области решения задачи на каждом шаге по времени.

Программная реализация алгоритмов численного решения краевых задач выполнена в пакете математического моделирования MATLAB с использованием разработанных оригинальных программных кодов и приложения Partial Differential Equation Toolbox for MATLAB. Также использовались открытые и коммерческие пакеты для численного моделирования физических процессов – OpenFOAM, COMSOL Multiphysics и ANSYS Fluent для верификации оригинальных программных кодов. Экспериментальные исследования выполнены с использованием лабораторных стендов, созданных в Томском политехническом университете.

На защиту выносятся:

1. Новый подход к анализу тепломассопереноса в тепловой защите систем транспортировки и хранения энергоносителей (тепло- и холодопроводы, хранилища топлив и СПГ) заключающийся в использовании моделей математической физики и учете основных факторов и процессов, влияющих на интенсификацию процессов переноса в рассматриваемых системах.

2. Результаты анализа влияния основных значимых факторов и процессов на интенсификацию тепломассопереноса в тепловой защите систем транспортировки и хранения энергоносителей.

3. Комплексные методики численного анализа тепловых режимов и тепловых потерь систем транспортировки и хранения энергоносителей, эксплуатируемых в условиях увлажнения тепловой изоляции с учетом нестационарности процессов тепломассопереноса, фазовых переходов и взаимодействия с окружающей средой.

4. Методики оценки тепловых потерь элементов теплопроводов тепловых сетей, учитывающие полный спектр возможных условий эксплуатации и факторов, приводящих к росту тепловых потерь (наличие конвективного движения среды в полостях каналов теплопроводов, нестационарность процессов переноса, дефекты теплозащитных покрытий, наличие дополнительных термических сопротивлений, взаимодействие с окружающей средой).

5. Методики численного анализа тепловых потерь резервуаров для хранения топлива и СПГ с учетом взаимодействия с окружающей средой.

6. Результаты экспериментального исследования тепловых потерь теплопроводов в условиях увлажнения изоляции и коэффициентов водопроницаемости ряда современных теплоизоляционных материалов.

Достоверность основных положений и выводов

Численное моделирование процессов тепломассопереноса выполнено при обобщенных значениях параметров разностной сетки и шага интегрирования по времени. Оценка достоверности результатов работы проводилась тестированием на примере задач тепломассопереноса использовавшихся численных методов и элементов разработанных алгоритмов решения краевых задач тепломассопереноса, проверкой консервативности разностных схем, сопоставлением с известными экспериментальными данными, в предельных случаях – с результатами математического моделирования других исследователей.

При проведении экспериментальных исследований использовались современные методы обработки полученных данных с применением метрологически аттестованной контрольно-измерительной аппаратуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке: РФФИ (проекты: 05-02-98006 конкурс $p_обв_a$; 08-08-00143-а; 10-08-16038-моб $з_рос$; 12-08-00201-а; 12-08-09285-моб $з$; 16-08-00229-а; 18-48-700008 p_a ; 19-18-00001-д), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, контракт № П 1445 от 03.09.09 и грантов Президента РФ (проекты: МК-1284.2011.8 и МК-1652.2013.8).

Апробация результатов исследования.

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на IV, V, VI и VII Российских национальных конференциях по теплообмену, г. Москва (2006 г., 2010 г., 2014 г., 2018 г.); VI, XIV, XV Минских международных форумах по тепломассообмену, г. Минск, Беларусь (2008 г., 2012 г., 2016 г.); XXVIII, XXIX, XXXI, XXXIII и XXXIV Сибирских теплофизических семинарах, г. Новосибирск (2005 г., 2010 г., 2014 г., 2017 г., 2018 г.); Международных конференциях «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», г. Алушта, Украина, (2012 г., 2013 г.); Всероссийских научных конференциях «Теплофизические основы энергетических технологий», г. Томск (2009 г. – 2019 г.) и других международных, всероссийских и региональных научных мероприятиях.

Диссертация соответствует паспорту специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» по п. 9 «Разработка научных основ и создание методов интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты».

Личный вклад автора заключается в выборе научного направления исследований, постановке новых задач тепломассопереноса в тепловой защите систем транспортировки и хранения энергоносителей, выборе методов и разработке алгоритмов решения задач, проведении теоретических исследований влияния большой группы значимых факторов на характеристики процессов тепломассопереноса, сопоставлении полученных результатов с известными экспериментальными и теоретическими данными, обобщении теоретических следствий, разработке методик численного анализа тепловых потерь и тепловых режимов рассматриваемых систем, формулировке основных положений и выводов диссертационной работы.

На различных этапах в проведении исследований участвовали аспиранты (Цыганкова Ю.С., Долгов С.В.) и студенты (Кравченко Д.К., Рябичев Т.В., Рахимова Ю.Н., Ярошенко Р.С., Губина Е.В., Хабибулин А.М., Хузеев В.А., Губанов Ю.Ю., Пискунов М.В., Шалыгин С.Е., Глазырин Е.С., Тетерина Н.С., Жумабаева Н.Б., Махсутбек Ф.Т., Ожикенова Ж.Ф., Табакаев Д.О.) Томского политехнического университета. Всем им автор выражает глубокую благодарность.

Автор считает своим приятным долгом выразить признательность и поблагодарить научного консультанта – доктора физико-математических наук, профессора Кузнецова Геня Владимировича.

Публикации

Результаты работы опубликованы в 1 монографии и более чем в 100 научных трудах, в том числе в 65 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК. В международных рецензируемых изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science, опубликованы 27 статей. Получено 9 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ. В конце автореферата приведен список наиболее значимых публикаций.

Результаты работы **используются** в следующих проектных, строительных и теплоснабжающих организациях: КОГУП «Агентство энергосбережения», г. Киров, РФ; ЗАО «Восточная инвестиционная газовая компания», г. Томск, РФ; ООО «Специальное конструкторско-технологическое бюро комплексной технологии электро-монта – Кривбас», г. Кривой Рог, Украина; НПБК «Каппа», г. Днепрпетровск, Украина; ООО «Теплосервис», г. Томск, РФ; Коммунальное предприятие «Харьковские тепловые сети», г. Харьков, Украина; ОАО «Энергетическая компания», г. Полысаево, РФ; ООО «НЕФТЕГАЗНАЛАДКА», г. Томск, РФ; ООО «СтройСнаб-Ремонт», г. Томск, РФ; ООО «СтройПроектМонтаж», г. Томск, РФ; АО «Научно-исследовательский институт по строительству трубопроводов», г. Москва, РФ; ООО «С-К Молчаново», г. Томск, РФ; ООО «ТВК Строймонтаж», г. Томск, РФ; ООО «ФАКТУМ Северо-Запад», г. Санкт-Петербург, РФ; ООО «Строительное монтажное управление - 9», г. Томск, РФ; ООО «Жилсервис Кировский», г. Томск, РФ; НПО «Внедрение энергосберегающих технологий», г. Томск, РФ; ООО «ЮгЭнергоИнжиниринг», г. Краснодар, РФ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 279 наименований, 2 приложений. Основной текст диссертации содержит 400 страниц, включая 118 рисунков и 111 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы исследований, сформулированы цель и задачи работы, определены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, описаны применяемые в работе методы исследования, приведены положения, выносимые на защиту, описаны степень достоверности и апробация результатов, охарактеризован личный вклад автора, а также описана структура работы.

В первой главе приведено описание процессов тепло-влажностного переноса в тепловой изоляции теплопроводов тепловых сетей. Эксплуатация теплопроводов в условиях увлажнения изоляции (затопления) сопровождается интенсивным ростом тепловых потерь. Их анализ проведен на примере теплопровода уложенного в одноячейковый заполненный водой железобетонный канал. В случае частичного погружения теплопровода в воду в полости канала выделялись области, занятые воздухом и водой (рисунок 1). Анализ проводился для следующих конфигураций теплопроводов:

1. Широко распространенная – трубопровод диаметром 600 мм, теплоизоляция из минеральной ваты (МВ) толщиной 70 мм;
2. Интенсивно применяющаяся – трубопровод диаметром 600 мм, тепловая изоляция – пенополиуретан (ППУ) (толщина 50 мм).

Толщина слоя воды (воздуха), обусловленная геометрическими параметрами стандартных каналов сетей теплоснабжения, принималась равной 246 мм. Значение температуры в рассматриваемой области решения в начальный момент времени принималось равным: $T_0=282$ К. Диапазон изменения температуры внутренней поверхности $T_{п1}$ задавался в пределах 373 – 403 К и соответствовал типичным температурам теплоносителя при работе теплосетей. Температура внешней поверхности принималась равной: $T_{п2}=282$ К.

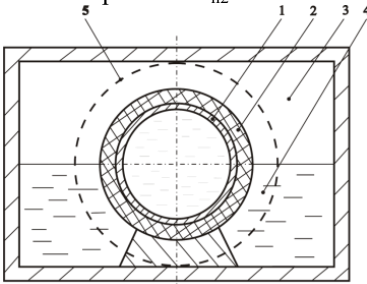


Рисунок 1 – Схематическое изображение области решения: 1 – труба; 2 – изоляция; 3 – воздух; 4 – вода; 5 – внешняя граница области решения

В таблице 1 приведены характеристики теплоизоляционных материалов.

Таблица 1 – Характеристики тепловой изоляции

Характеристика		МВ	ППУ
Пористость	Открытая	0.73	0.1
	Закрытая	0.15	0.8
Проницаемость, м ²		$3.75 \cdot 10^{-11}$	$8.8 \cdot 10^{-14}$
Теплопроводность каркаса материала, Вт/(м·К)		0.17	0.18
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)		0.059	0.022
Коэффициент диффузии, м ² /с		$4.5 \cdot 10^{-7}$	$1.9 \cdot 10^{-10}$

Математическая постановка задачи имеет следующий вид:

$$\tau > 0, R_1 \leq r < R_2, 0 \leq \Theta \leq \pi; \frac{\partial T_{тр}}{\partial \tau} = a_{тр} \left(\frac{\partial^2 T_{тр}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{тр}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_{тр}}{\partial \Theta^2} \right); \quad (1)$$

$$\tau > 0, R_2 < r < R_3, 0 \leq \Theta \leq \pi; C_{\text{эф}} \rho_{\text{эф}} \frac{\partial T_{\text{и}}}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{\text{эф}} \cdot r \frac{\partial T_{\text{и}}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \Theta} \left(\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T_{\text{и}}}{\partial \Theta} \right); \quad (2)$$

$$\tau > 0, R_3 < r \leq R_4, 0 \leq \Theta < \frac{\pi}{2}; \frac{\partial T_{\text{возд}}}{\partial \tau} = a_{\text{возд}} \left(\frac{\partial^2 T_{\text{возд}}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{\text{возд}}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_{\text{возд}}}{\partial \Theta^2} \right); \quad (3)$$

$$\tau > 0, R_3 < r \leq R_4, \frac{\pi}{2} < \Theta \leq \pi; \frac{\partial T_{\text{вода}}}{\partial \tau} = a_{\text{вода}} \left(\frac{\partial^2 T_{\text{вода}}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{\text{вода}}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_{\text{вода}}}{\partial \Theta^2} \right). \quad (4)$$

$$\tau = 0, R_1 \leq r \leq R_4, 0 \leq \Theta \leq \pi, T_{\text{тр}} = T_{\text{и}} = T_{\text{возд}} = T_{\text{вода}} = T_0 = \text{const}. \quad (5)$$

$$\tau > 0, r = R_1, 0 \leq \Theta \leq \pi, T_{\text{тр}} = T_{\text{и1}} = \text{const}; \quad (6)$$

$$\tau > 0, r = R_2, 0 \leq \Theta \leq \pi, -\lambda_{\text{тр}} \frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial r} = -\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T_{\text{и}}}{\partial r}, T_{\text{тр}} = T_{\text{и}}; \quad (7)$$

$$\tau > 0, r = R_3, 0 \leq \Theta < \frac{\pi}{2}, -\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T_{\text{и}}}{\partial r} = -\lambda_{\text{возд}} \frac{\partial T_{\text{возд}}}{\partial r}, T_{\text{и}} = T_{\text{возд}}; \quad (8)$$

$$\tau > 0, r = R_3, \frac{\pi}{2} < \Theta \leq \pi, -\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T_{\text{и}}}{\partial r} = -\lambda_{\text{вода}} \frac{\partial T_{\text{вода}}}{\partial r}, T_{\text{и}} = T_{\text{вода}}; \quad (9)$$

$$\tau > 0, r = R_4, 0 \leq \Theta < \frac{\pi}{2}, T_{\text{возд}} = T_{\text{п2}} = \text{const}; \quad (10)$$

$$\tau > 0, r = R_4, \frac{\pi}{2} < \Theta \leq \pi, T_{\text{вода}} = T_{\text{п2}} = \text{const}; \quad (11)$$

$$\tau > 0, R_1 \leq r < R_2, \Theta = 0, \frac{\partial T_{\text{тр}}}{\partial \Theta} = 0; \quad (12)$$

$$\tau > 0, R_1 \leq r < R_1, \Theta = \pi, \frac{\partial T_{\text{и}}}{\partial \Theta} = 0; \quad (13)$$

$$\tau > 0, R_2 < r < R_3, \Theta = 0, \frac{\partial T_{\text{и}}}{\partial \Theta} = 0; \quad (14)$$

$$\tau > 0, R_2 < r < R_3, \Theta = \pi, \frac{\partial T_{\text{и}}}{\partial \Theta} = 0; \quad (15)$$

$$\tau > 0, R_3 < r \leq R_4, \Theta = 0, \frac{\partial T_{\text{возд}}}{\partial \Theta} = 0; \quad (16)$$

$$\tau > 0, R_3 < r \leq R_4, \Theta = \pi, \frac{\partial T_{\text{вода}}}{\partial \Theta} = 0. \quad (17)$$

Теплофизические характеристики тепловой изоляции определялись как эффективные. Например, коэффициент теплопроводности тепловой изоляции $\lambda_{\text{эф}}$ рассчитывался из выражения:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_{\text{и}} \varphi_{\text{и}} + \lambda_{\text{в}} \varphi_{\text{в}}. \quad (18)$$

Обозначения: T – температура, К; τ – время, с; a – температуропроводность, м²/с; r – координата, м; R – граница области расчета; C – теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); φ – объемная доля; тр – стенка трубы; и – слой изоляции; в – слой воды; 0 – начальный момент времени; п1 – внутренняя поверхность; п2 – внешняя поверхность; эф – эффективный; 1, 2, 3, 4 – номера границ области расчета (рисунок 1).

В таблице 2 приведены результаты численного исследования величин тепловых потерь теплопровода в условиях частичного затопления канала теплосети.

Таблица 2 – Теплопотери q_L теплопровода в условиях частичного затопления

Изоляция		МВ				ППУ			
$T_{пл}, K$		373	383	393	403	373	383	393	403
Затопление канала, %	0	24.3	27.0	29.6	32.3	19.5	21.6	23.8	25.9
	25	51.6	57.1	62.8	68.5	28.8	32.0	35.2	38.3
	50	79.0	87.3	96.0	104.6	38.1	42.3	46.5	50.7
	100	133.1	147.7	162.4	177.0	56.8	63.0	69.3	75.5

Анализ данных таблицы 2 свидетельствует о том, что величина теплопотерь трубопровода, находящегося в условиях частичного погружения в воду, прямо пропорциональна возрастанию степени затопления канала теплотрассы водой.

Предварительно были проведены численные исследования тепловых потерь с использованием одномерной модели. Сопоставление результатов численного анализа теплопотерь теплопроводов находящихся в условиях затопления, проведенных на основании одномерной и двумерной вариантов модели показывает, что применение двумерной модели рассматриваемой системы не приводит к значительному уточнению получаемых результатов (отклонение не более 0.04 %). Следовательно, для анализа масштабов теплопотерь с поверхности трубопроводов, работающих в режимах увлажнения теплоизоляции, можно использовать более простую одномерную модель.

При анализе режимов работы теплопровода в условиях конвективного теплообмена на его внешней поверхности из рассмотрения исключались области 3 и 4 (рисунок 1), а на внешнем контуре вводились граничные условия третьего рода:

$$\tau > 0, r = R_3, 0 \leq \Theta < \frac{\pi}{2}, -\lambda_{эф} \frac{\partial T_{и}}{\partial r} = \alpha_{возд} [T_{и}(\tau, R_3, \Theta) - T_{окр}]; \quad (19)$$

$$\tau > 0, r = R_3, \frac{\pi}{2} \leq \Theta < \pi, -\lambda_{эф} \frac{\partial T_{и}}{\partial r} = \alpha_{вода} [T_{и}(\tau, R_3, \Theta) - T_{окр}]. \quad (20)$$

Обозначения: Θ – текущий угол, рад; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); вода – слой воды, возд – слой воздуха, окр – окружающая среда.

Анализ проводился для условий естественной и вынужденной конвекции. Температура окружающей среды принималась равной: $T_{окр} = 296.3$ К. В режимах вынужденной конвекции рассматривались умеренные, реально возможные скорости $V_{окр}$ (до 1 м/с) движения окружающих трубопровод сред. Средние коэффициенты теплоотдачи определялись по известным критериальным уравнениям. Результаты этих численных экспериментов приведены в таблицы 3, 4. Из анализа таблиц 3, 4 видно, что доминирующую роль в увеличении тепловых потерь играет рост влагосодержания тепловой изоляции.

Таблица 3 – Тепловые потери при естественной конвекции ($T_{пл}=373$ К)

Изоляции	МВ					ППУ				
φ_v	0.00	0.20	0.40	0.60	0.73	0.00	0.025	0.050	0.075	0.100
$q_L, \text{Вт/м}$	140.8	398.9	653.7	905.0	1066.4	68.3	113.4	158.4	203.3	248.1
Отклонение от СНиП 41-03-2003, ед.	1.23	3.49	5.73	7.94	9.35	–	–	1.39	1.78	2.17

Таблица 4 – Тепловые потери при вынужденной конвекции ($V_{\text{окр}}=1$ м/с)

Вариант расчета	Вид изоляции	$\varphi_{\text{в}}$	$T_{\text{пл}}, \text{K}$			
			373	383	393	403
$q_L, \text{Вт/м}$	МВ	0.00	141.30	159.72	178.14	196.57
		0.20	402.40	454.88	507.36	559.84
		0.40	662.98	749.44	835.91	922.37
		0.60	922.95	1043.3	1163.7	1284.1
		0.73	1091.5	1233.8	1376.2	1518.5
	ППУ	0.00	68.42	77.34	86.26	95.18
		0.025	113.72	128.54	143.37	158.20
		0.050	159.00	179.73	200.47	221.19
		0.075	204.30	230.94	257.57	284.19
		0.100	249.43	281.92	314.43	346.93

Таблицы 3, 4 свидетельствуют о том, что режим теплообмена не играет существенной роли при оценке тепловых потерь трубопроводов, эксплуатируемых в условиях затопления. Разность результатов численных исследований достаточно мала (менее 4.5 %), что дает возможность исключить из рассмотрения внешнюю область 5 (рисунок 1) для условий полного затопления канала, а также областей 3 и 4 для режимов работы в состоянии частичного затопления.

В реальных режимах работы теплопроводов изоляция пропитывается влагой в течение некоторого промежутка времени и поэтому рассмотрен процесс фильтрации наружной воды в слой пористого теплоизоляционного материала.

Уравнение неразрывности для фильтрующейся в слое изоляции воды и соответствующие ему начальные и граничные условия имеют следующий вид:

$$\frac{\partial \varphi_{\text{ж}}}{\partial \tau} + \frac{\partial (U_{\text{ж}} \varphi_{\text{ж}})}{\partial r} + \frac{U_{\text{ж}}}{r} \varphi_{\text{ж}} = 0, \quad \tau > 0, R_2 \leq r \leq R_3; \rho_{\text{ж}} = \text{const.} \quad (21)$$

$$\tau = 0, R_2 \leq r \leq R_3, \quad \varphi_{\text{ж}} = 0; \quad (22)$$

$$\tau > 0, r = R_3, \quad \varphi_{\text{ж}} = f. \quad (23)$$

Скорость движения жидкости $U_{\text{ж}}$ определялась из соотношения:

$$U_{\text{ж}} = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r}, \quad R_2 \leq r \leq R_3; \quad (24)$$

$$r = R_2, \quad P = P_2; \quad (25)$$

$$r = R_3, \quad P = P_3. \quad (26)$$

Обозначения: U – скорость фильтрации, м/с; f – пористость; k – проницаемость, м^2 ; μ – вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$; P – давление, Па ; 2, 3 – номера границ областей (рисунок 1); ж – жидкость.

В таблице 5 даны характерные времена насыщения теплоизоляции влагой.

Таблица 5 – Характерные времена насыщения теплоизоляции влагой

Вариант численного эксперимента	Изоляция	Перепад давлений, Па					
		10	20	50	100	500	1000
Длительность насыщения изоляции влагой, с	МВ	$2 \cdot 10^4$	10^4	$5 \cdot 10^3$	2500	500	300
	ППУ	$4.5 \cdot 10^6$	$2.5 \cdot 10^6$	10^6	$5 \cdot 10^5$	10^5	$5 \cdot 10^4$

Анализ результатов численных экспериментов позволяет сделать вывод о том, что для материалов с относительно высоким коэффициентом проницаемости (МВ)

нестационарным процессом увлажнения, в силу его малой продолжительности, можно пренебречь. В случае же с материалами, имеющими достаточно низкую проницаемость (ППУ), нестационарный процесс насыщения теплоизоляции влагой необходимо учитывать при проведении оценок масштабов тепловых потерь.

Отдельной проблемой при проведении моделирования процессов теплопереноса в увлажненной тепловой изоляции теплопроводов является достоверное знание физических характеристик изоляционных материалов, поскольку их значения во многом определяют интенсивность протекания процессов переноса.

Эксперименты по определению коэффициентов водопроницаемости проводились с использованием лабораторного стенда (рисунок 2).

Коэффициент водопроницаемости K рассчитывался по формуле:

$$K = \frac{Q \nu L}{g \Delta h S}, \text{ м}^2;$$

где Q – объемный расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$; ν – кинематическая вязкость воды, $\text{м}^2/\text{с}$; L – толщина слоя испытуемого материала, м ; g – ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$; Δh – разность уровней жидкости в пьезометрических трубках над образцом и у его основания, м ; S – площадь сечения рабочего участка, м^2 .

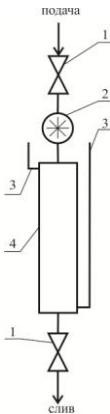


Рисунок 2 – Схема лабораторного стенда: 1 – вентиль; 2 – расходомер; 3 – пьезометрическая трубка; 4 – рабочий участок

В качестве исследуемых материалов были выбраны три наиболее распространенных в РФ вида волокнисто-пористой тепловой изоляции: термоплита KNAUF 037, стекловата LINEROCK Лайт П-30 (ISOVER) и минераловатная плита Rockwool ВЕНТИ БАТТС Д.

На рисунке 3 представлены зависимости значений коэффициентов проницаемости K от скорости фильтрации V , а также показаны величины доверительных интервалов.

Сопоставление результатов исследований (рисунок 3) с известными данными по проницаемости волокнисто-пористых материалов (таблица 1) показало, что расхождение между ними является существенным.

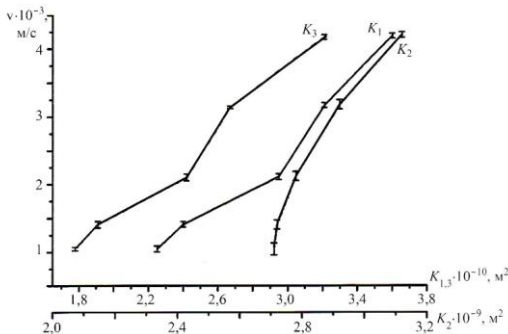


Рисунок 3 – Результаты исследований водопроницаемости теплоизоляционных материалов:
 K_1 – термоплита KNAUF 037;
 K_2 – стекловата LINEROCK Лайт П-30;
 K_3 – минераловатная плита Rockwool ВЕНТИ БАТТС Д

Это объясняется следующим образом. В таблице 1 приведены значения проницаемости для материалов выпущенных в 50–60 годах прошлого столетия. В то время при производстве волокнисто-пористых теплоизоляционных материалов, характеризовавшихся следующими геометрическими параметрами волокна: диаметр 1–40 мкм, длина 15–40 мм, в качестве связующего элемента использовался битум. В настоящее время типичные волокнисто-пористые материалы имеют диаметр волокна не более 3–5 мкм, длина волокна составляет 150 мм и более, а связующим веществом является синтетические материалы. Следовательно, волокнисто-пористые материалы, изготавливаемые по устаревшим технологиям, объективно имеют существенно более низкие коэффициенты проницаемости.

Влага, находящаяся в пористой структуре тепловой изоляции, при контакте с поверхностью «горячей» трубы будет испаряться. При проведении анализа влияния испарения влаги предполагалось, что теплопровод, эксплуатируется в условиях затопления, что соответствует максимальному увлажнению изоляции. В момент времени отличный от нуля на внутренней поверхности трубы R_1 устанавливается температура равная температуре теплоносителя в трубе, а на границе раздела «стенка трубы – слой тепловой изоляции» R_2 начинается испарение влаги (рисунок 4). Образующийся пар диффундирует через слой увлажненной изоляции в направлении к внешней поверхности R_3 .

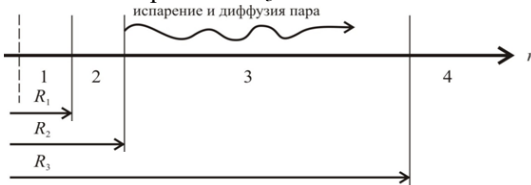


Рисунок 4 – Схематическое изображение области решения:

1 – теплоноситель; 2 – труба;
3 – изоляция; 4 – окружающая среда

Математическая постановка задачи в этом случае имеет вид:

$$\tau \geq 0, R_1 \leq r < R_2; \quad c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} \right); \quad (27)$$

$$\tau \geq 0, R_2 < r \leq R_3; \quad c_{ef}(\tau, r) \rho_{ef}(\tau, r) \frac{\partial T_3}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{ef}(\tau, r) r \frac{\partial T_3}{\partial r} \right); \quad (28)$$

$$\tau = 0, R_1 \leq r \leq R_3; \quad T_2 = T_3 = T_0 = \text{const}; \quad (29)$$

$$\tau \geq 0, r = R_1; \quad T_2 = T_m = \text{const}; \quad (30)$$

$$\tau \geq 0, r = R_2; \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \lambda_{ef}(\tau, R_2) \frac{\partial T_3}{\partial r} + jq; \quad T_2 = T_3; \quad (31)$$

$$\tau \geq 0, r = R_3; \quad -\lambda_{ef}(\tau, R_3) \frac{\partial T_3}{\partial r} = \alpha(T_3 - T_{ex}); \quad (32)$$

$$\tau \geq 0, R_2 \leq r < R_3; \quad \frac{\partial C_{st}}{\partial \tau} = D_3 \left(\frac{\partial^2 C_{st}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{st}}{\partial r} \right); \quad (33)$$

$$\tau = 0, R_2 \leq r \leq R_3; \quad C_{st} = C_0 = \text{const}; \quad (34)$$

$$\tau \geq 0, r = R_2; \quad -D_3 \rho_{ef}(\tau, R_2) \frac{\partial C_{st}}{\partial r} = j; \quad (35)$$

$$\tau \geq 0, r = R_3; \quad -D_3 \frac{\partial C_{st}}{\partial r} = \beta(C_{st} - C_{ex}). \quad (36)$$

Обозначения: β – коэффициент массоотдачи, м/с; C – относительная объемная концентрация; D – коэффициент диффузии, м²/с; R – граница области, м; c – теплоемкость, Дж/(кг·К); f – открытая пористость; j – плотность потока массы, кг/(м²·с); q – теплота фазового перехода, Дж/кг; r – координата, м; 0 – начальный момент; 1, 2, 3 – номера областей расчета; dif – диффузия; dry – сухой; ef – эффективный; ev – испарение; ex – наружный; in – внутренний; max – максимальный; p – парциальный; s – насыщение; st – пар; w – вода; wet – увлажненный.

Значение температуры в рассматриваемой области решения в начальный момент времени принималось равным $T_0=298$ К, а температура внутренней поверхности трубы – $T_{in}=338; 363; 383$ К. Температура окружающей трубопровод среды составляла $T_{ex}=298$ К. Коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к внешней среде принимался равным $\alpha = 11$ Вт/(м²·К). Начальные относительные объемные концентрации воды и пара в пористой структуре слоя тепловой изоляции принимались равными $C_w=f$ и $C_{st}=0$, а относительная объемная концентрация пара в окружающей среде – $C_{ex}=0$.

В таблице 6 приведены значения тепловых потерь рассматриваемой системы в условиях, когда изоляция не увлажнена Q_{dry} , изоляция увлажнена Q_{wet} , изоляция увлажнена и учитывается испарение влаги на поверхности трубы Q_{ev} , изоляция увлажнена, учитывается испарение и диффузия пара Q_{dif} .

Таблица 6 – Результаты численного моделирования

Вид изоляции	T_{in} , К	Q_{dry} , Вт/м	Q_{wet} , Вт/м	Q_{ev} , Вт/м	Q_{dif} , Вт/м	C_{st}^{max}
МВ	338	68.1	387.0	430.6	414.4	0.0506
	363	110.7	639.4	845.3	794.5	0.0935
	383	144.7	842.6	1309.1	1202.5	0.1112
ППУ	338	35.5	124.9	168.5	168.1	0.0005
	363	57.6	206.6	412.7	409.5	0.0024
	383	75.4	272.5	739.7	729.7	0.0056

Результаты численного моделирования, приведенные в табл. 6, свидетельствуют о том, что во всех вариантах численного моделирования уровень тепловых потерь теплопровода, изолированного ППУ существенно ниже, чем при использовании МВ, что объясняется значениями теплофизических характеристик (таблица 1).

В таблице 7 приведено сопоставление результатов численного анализа тепловых потерь теплопровода. Эти данные позволяют сделать следующие выводы:

тепловые потери теплопроводов в условиях увлажнения изоляции без учета эффекта испарения (Q_{wet}) возрастают на 70-80 % по сравнению с тепловыми потерями теплопровода, имеющего сухую изоляцию (Q_{dry});

вклад эффекта испарения влаги на поверхности трубы в тепловые потери теплопроводов составляет от 10.1 до 35.6 % при использовании тепловой изоляции из МВ и от 25.9 до 63.1 % для ППУ изоляции, что свидетельствует о необходимости учета этого процесса.

Более высокая составляющая эффекта испарения в тепловых потерях теплопровода с изоляцией из ППУ объясняется тем, что ППУ изоляция имеет более низкую теплопроводность и открытую пористость по сравнению с МВ, а, следовательно, и существенно меньшую эффективную теплопроводность.

Учет паровой компоненты в увлажненной тепловой изоляции теплопроводов приводит к снижению эффективной теплопроводности (из-за сравнительно невысоких теплофизических характеристик водяного пара) и соответственно к уменьшению общего уровня тепловых потерь.

Таблица 7 – Сопоставление результатов численного моделирования

Вид изоляции	$T_{in},$ К	$\frac{Q_{wet} - Q_{dry}}{Q_{wet}} 100\%$	$\frac{Q_{ev} - Q_{wet}}{Q_{ev}} 100\%$	$\frac{Q_{ev} - Q_{dif}}{Q_{ev}} 100\%$	$\frac{Q_{dif} - Q_{dry}}{Q_{dif}} 100\%$
МВ	338	82.4	10.1	3.7	83.6
	363	82.7	24.3	6.0	86.1
	383	82.8	35.6	8.1	88.0
ППУ	338	71.6	25.9	0.2	78.9
	363	72.1	49.9	0.8	85.9
	383	72.3	63.1	1.3	89.7

Снижение уровня тепловых потерь теплопроводов в условиях увлажнения изоляции с учетом диффузии испаряющейся компоненты ограничено значениями C_{st} . Значения C_{st} сравнительно невелики, однако позволяют заметно уточнить значения тепловых потерь.

Анализ нестационарности процессов переноса (таблица 8) свидетельствует о том, что время выхода процессов теплопереноса на стационарный режим при использовании изоляции из МВ не превышает 5.5 часов, а для изоляции из ППУ составляет более 3.5 месяцев.

Таблица 8 – Временные характеристики

Вид изоляции	Время выхода на стационарный режим, с	
	Задача диффузии	Общее
МВ	$5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$
ППУ	10^7	

Анализ результатов, приведенных в таблице 8, позволяет сделать заключение о том, что для теплоизоляционных материалов с относительно высокими коэффициентами диффузии (МВ) нестационарными процессами теплопереноса вследствие их малой продолжительности можно пренебречь. Для материалов имеющих низкие коэффициенты диффузии (ППУ), эти процессы необходимо учитывать при проведении оценки тепловых потерь теплопроводов.

Экспериментальное определение тепловых потерь теплопроводов в условиях затопления выполнено с использованием лабораторного стенда (рисунок 5), представляющего собой модель однетрубного теплопровода канальной прокладки.

В центральной части на внешних поверхностях ТЭНа, изоляции, кожуха и покровного слоя (рисунок 5), а также полутолщине слоя изоляции заложены хромель-копелевые термопары, сигнал от которых передавался к измерителю температуры УТК 38-Щ4-ТП. Систематическая погрешность измерения температуры не превышала 2 – 3 %. Линейный тепловой поток от ТЭНа Q определялся косвенно с погрешностью 0,5 % как Джоулевы потери отнесенные к длине ТЭНа.

Предварительно были проведены опыты по определению тепловых потерь теплопровода Q_1 без затопления рассматриваемой системы. Также выполнены расчеты тепловых потерь Q_2 теплопровода в условиях максимального увлажнения тепловой изоляции (затопления) с использованием подходов, предлагаемых в диссертации.

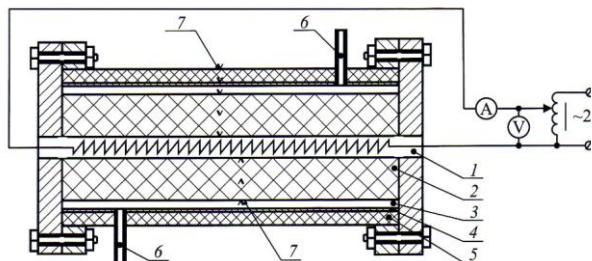


Рисунок 5 – Схема экспериментального стенда:

- 1 – ТЭН; 2 – тепловая изоляция;
- 3 – полость кожуха; 4 – кожух;
- 5 – покровный слой; 6 – патрубки;
- 7 – места закладки термпар

Основные результаты экспериментальных исследований тепловых потерь Q теплопровода в условиях затопления приведены в таблице 9.

Анализ результатов (таблица 9) говорит о том, что относительная разность δ_2 между результатами экспериментальных исследований и результатами расчетов тепловых потерь является незначительной и не превышает 4 %. Это обстоятельство подтверждает возможность использования предлагаемых в диссертации подходов для оценки тепловых потерь теплопроводов в условиях затопления.

Таблица 9 – Результаты экспериментальных исследований

$T, ^\circ\text{C}$	$Q, \text{Вт/м}$	$Q_1, \text{Вт/м}$	$Q_2, \text{Вт/м}$	$\delta_1=Q/Q_1$	$\delta_2= (Q-Q_2)/Q_1 \cdot 100, \%$
70	26,36	7,30	27,09	3,61	2,76
80	32,92	10,23	34,08	3,21	3,92
90	45,49	13,37	46,05	3,40	1,23

Процессы сушки тепловой изоляции теплопроводов, эксплуатировавшихся в условиях затопления, до настоящего времени не анализировались, поскольку подобные режимы работы считались аварийными и заведомо нереализуемыми. Однако современное состояние сетей теплоснабжения убеждает в высокой вероятности развития подобных сценариев.

Для проведения экспериментов по анализу сушки тепловой изоляции теплопроводов, эксплуатировавшихся в условиях затопления, использовался лабораторный стенд, представляющий собой модель однотрубного теплопровода канальной прокладки (рисунок 5).

Эксперименты по определению длительности сушки тепловой изоляции теплопровода проводились следующим образом. Полость кожуха – 3 заполнялась водой через патрубок – 6, и изоляционная конструкция выдерживалась под водой в течение времени, необходимого для ее полного увлажнения. Затем полость кожуха осушалась через нижний патрубок – 6, и включался электрический нагреватель – 1.

Длительность сушки тепловой изоляции определялась по изменению показателя влажности, который рассчитывался как отношение массы влажного материала к начальной массе сухого. Во всех экспериментах по сушке в начальный момент времени показатель влажности составлял 380 % и рассчитывался как отношение текущей массы воды в изоляции к весу сухого изоляционного материала в процентах.

Количество удаленной влаги из полости кожуха и тепловой изоляции измерялось объемным способом с погрешностью не более 5 %. Считалось, что слой изоля-

ции теплопровода является высушенным тогда, когда значение показателя влажности теплоизоляции не изменяется во времени и не превышает 3–5 %. Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 10.

При численном анализе сушки тепловой изоляции теплопроводов использовалась математическая модель аналогичная задаче (27) – (36).

Результаты численного анализа процесса сушки тепловой изоляции трубопровода, эксплуатировавшегося в условиях затопления представлены в таблице 10. При численном анализе в качестве исходных данных принята конфигурация теплотрубопровода экспериментального стенда (рисунок 5).

Из данных таблицы 10 видно, что длительность сушки тепловой изоляции трубопровода, эксплуатировавшегося в условиях затопления, составляет несколько десятков часов. При этом с уменьшением температуры теплотрубопровода происходит соответствующее закономерное увеличение времени высыхания тепловой изоляции. Сопоставление результатов экспериментальных и численных исследований позволяет говорить о том, что относительная разность между ними составляет около 20 %, что является приемлемым при проведении инженерных оценок длительности сушки изоляции теплопроводов и подтверждает возможность использования предлагаемых моделей для оценки этих времен.

Таблица 10 – Длительность сушки тепловой изоляции трубопровода, эксплуатировавшегося в условиях затопления

$T_1, ^\circ\text{C}$	Длительность сушки, час	
	Эксперимент	Расчёт
70	46,3	60,0
80	30,0	36,1
90	20,0	22,8

Известно, что затопления каналов тепловых сетей сопровождаются не только существенным повышением тепловых потерь, а также способствует коррозии трубопроводов и разрушению тепловой изоляции.

Анализ действующих в тепловой изоляции напряжений можно провести на базе математических моделей (21)–(26) и (27)–(36). Следует отметить, что в рамках рассматриваемых моделей, максимальное давление пара в структуре тепловой изоляции лимитировано и для типичных конструкций теплопроводов тепловых сетей составляет $\sigma = 0.102306$ МПа.

На практике в большей степени распространены циклические затопления теплопроводов (наиболее часто осенью или весной), которые продолжаются конкретный период. В этом случае имеет место циклическая нагрузка, приводящая к формированию усталостных напряжений в структуре теплоизоляционного материала.

Известно, что разрушение материала наступает тогда, когда сумма относительных уменьшений долговечности становится равной единице:

$$\sum_i \Delta t_i / \tau(\sigma) = 1.$$

Здесь Δt – время действия напряжения σ в каждом акте нагружения, с; а $\tau(\sigma)$ можно записать в виде

$$\tau(\sigma) = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (37)$$

где $\tau_0 = 10^{-13}$ с; $U_0 = 192602$, Дж/моль – энергия активации процесса разрушения; $\gamma = 0.6738$, Дж/(моль·Па) – структурно-чувствительный коэффициент; k – постоянная Больцмана, Дж/К; T – температура, К.

После подстановки значений U_0 , γ и T в (37) и умножив знаменатель показателя степени экспоненты на число Авогадро, значение суммарного времени действия напряжения составит около 24 суток. По истечении этого времени произойдет разрушение тепловой изоляции.

Принимая во внимание то обстоятельство, что длительность затоплений каналов теплотрасс может варьироваться в достаточно широком диапазоне (от часов до нескольких недель), можно обоснованно утверждать о возможности не только частичного повреждения слоя тепловой изоляции, но и о его полном разрушении. Так, например если предположить, что затопление канала теплотрассы происходит два раза в год (весной и осенью) и длится одну неделю, то, в соответствии с предложенной методикой, полное разрушение изоляции произойдет менее чем через два года эксплуатации теплопровода в подобных условиях.

Вторая глава посвящена анализу процессов теплопереноса в конструкциях и зонах размещения бесканальных теплопроводов тепловых сетей.

Для анализа тепловых режимов и тепловых потерь бесканальных теплопроводов в реальных условиях эксплуатации разработан ряд математических моделей, учитывающих многие факторы, основными из которых являются: промерзание грунта и наличие снежного покрова в зоне над прокладкой (рисунок 6).

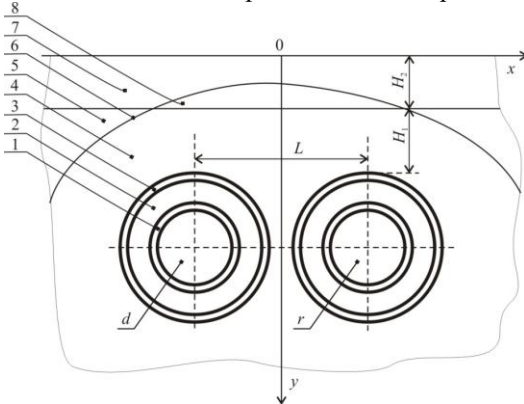


Рисунок 6 – Схема области решения:
1 – труба; 2 – тепловая изоляция; 3 – гидроизоляция; 4 – грунт талый; 5 – грунт мерзлый; 6 – граница между талой и мерзлой зонами; 7 – снег уплотненный; 8 – снег талый; d , r – подающий и обратный теплопроводы; H_1 – расстояние от поверхности грунта до гидроизоляции; L – расстояние между осями теплопроводов; H_2 – толщина снежного покрова

Математическая модель в этом случае представлялась в виде двумерных уравнений теплопроводности для тепловой изоляции, гидроизоляции, талого и мерзлого грунтов, талого и мерзлого снега с соответствующими краевыми условиями. Координаты границы раздела между талой и мерзлой зонами определялись по координатам изотермической линии 273 К в результате серии численных экспериментов.

Анализ проводился для трубопроводов с диаметрами условного прохода трубопроводов 600 мм, тепловая изоляция – ППУ (толщина 40 мм), покровный слой – полиэтилен (2 мм). Расстояния от поверхности грунта до верхних точек слоев гидроизоляции принималось равным $H_1 = 2$ м, а между осями трубопроводов составляло $L = 1.3$ м. Предполагалось, что тепловая сеть работает по температурному графику 95/70 °С. Толщина снежного покрова принималась равной количеству осадков, выпавших за холодный период года для города Томск $H_2 = 185$ мм. Температура

окружающей среды принималась равной температуре воздуха за отопительный период в городе Томск – 264.2 К. Коэффициент теплоотдачи на поверхности контакта с окружающей средой варьировался в пределах от 5 до 30 Вт/(м²·К).

В таблице 11 приведены значения теплофизических характеристик элементов рассматриваемой системы.

Таблица 11 – Теплофизические характеристики

Характеристика	Покровный слой	Тепловая изоляция	Стенка трубы	Грунт				Снег	
				Глинистый		Песчаный		Уплотненный	Начавший таять
				Та-лый	Мерз-лый	Та-лый	Мерз-лый		
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0.33	0.033	50.2	1.1	1.3	2.3	3.7	0.35	0.64
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	2200	1470	462	1231	959	1486	1005	2100	2100
Плотность, кг/м ³	920	50	7700	1700	1700	2000	2000	350	500

В таблице 12 показаны тепловые потери рассматриваемой системы с учетом промерзания грунта и снежного покрова над прокладкой Q_1 , а также без учета слоя снега Q_2 и потери $Q_{\text{норм}}$, вычисленные в соответствии со СНиП 41-03-2003.

Анализ изменения тепловых потерь в зависимости от значений коэффициентов теплоотдачи на границе раздела «уплотненный снег – окружающая среда» позволяет сделать вывод о том, что увеличение теплоотдачи в 6 раз приводит к росту тепловых потерь до 3.5 %. При наличии снежного покрова и прокладке теплопроводов в песчаных грунтах потери тепла снижаются на $\delta_1=14.03\text{--}15.86\%$, а в глинистых на $\delta_1=8.91\text{--}9.40\%$.

Таблица 12 – Результаты численного моделирования

Грунт	α , Вт/(м ² ·К)	Q_1 , Вт/м	Q_2 , Вт/м	$Q_{\text{норм}}$, Вт/м	$\delta_1 = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} 100\%$	$\delta_2 = \frac{Q_1 - Q_{\text{норм}}}{Q_1} 100\%$
Песчаный	5	124.39	144.70	175.32	14.03	-40.94
	10	126.79	149.94		15.44	-38.27
	20	128.36	152.27		15.70	-37.04
	30	128.91	153.21		15.86	-36.00
Глини- стый	5	93.07	102.17	129.73	8.91	-39.39
	10	94.63	104.30		9.27	-37.10
	20	95.42	105.26		9.35	-35.96
	30	95.69	105.62		9.40	-35.57

Сопоставление Q_1 с величиной $Q_{\text{норм}}$ позволяет говорить о том, что отклонение между ними δ_2 всегда является отрицательной величиной. Этот результат показывает, что СНиП 41-03-2003 дает завышенные значения тепловых потерь бесканальных теплопроводов. Эти обстоятельства свидетельствуют о необходимости учета рассматриваемых факторов при анализе тепловых потерь теплопроводов.

На рисунке 7, в качестве примера, приведено типичное температурное поле в зоне размещения бесканального теплопровода в условиях промерзания грунта и слоя снега при прокладке в песчаном грунте и $\alpha = 5$ Вт/(м²·К). На рисунке 7 изотермическая линия 273 К соответствует границе раздела мерзлых и талых сред.

Распределения температур в рассматриваемой области решения показывают, что изотермические линии сгущаются непосредственно над трубопроводами и более разрежены при удалении от них.

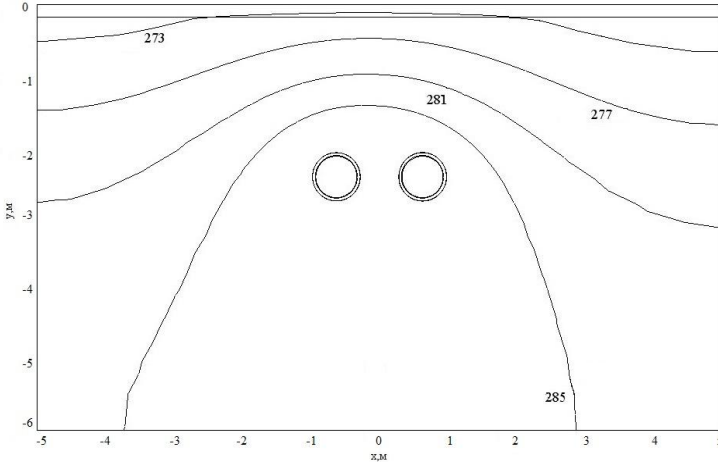


Рисунок 7 – Типичное температурное поле для рассматриваемой области решения, К

Еще одной наиболее типичной задачей при анализе тепловых режимов бесканальных теплопроводов является исследование нестационарности процессов переноса. Схематическое изображение области решения приведено на рисунке 8.

Предполагалось, что регулирование тепловой нагрузки в сети осуществляется количественным способом, а температуры внутренних поверхностей трубопроводов в отопительном периоде равны $T_{п}=338$ К и $T_{о}=323$ К (температурный график 95/70 °С). Амплитуда колебания температуры наружного воздуха принималась как разница между наивысшей и самой низкой температурами за год. Исследования проводились для климатических условий г. Томск. Начальное распределение температур в рассматриваемой области решения принималось равным $T_{п}=282,2$ К и соответствовало значению температуры окружающей среды в начале отопительного периода.

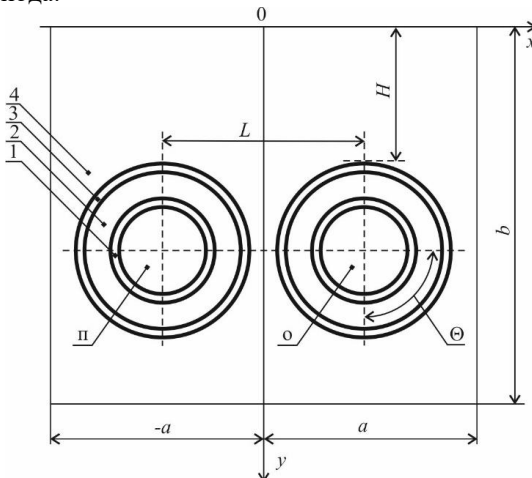


Рисунок 8 – Схема области решения:

1 – труба; 2 – тепловая изоляция; 3 – гидроизоляция; 4 – грунт; п, о – подающий и обратный теплопроводы; H – расстояние от поверхности грунта до гидроизоляции; L – расстояние между осями трубопроводов; a , b – размеры области решения

Математическая постановка задачи для рассматриваемой области решения будет описываться следующими соотношениями:

$$C_i \rho_i \frac{\partial T_{i,n}}{\partial \tau} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_{i,n}}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial T_{i,n}}{\partial x} + \frac{1}{x^2} \frac{\partial^2 T_{i,n}}{\partial \Theta^2} \right), i=1-3, \quad (38)$$

$$C_i \rho_i \frac{\partial T_{i,o}}{\partial \tau} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_{i,o}}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial T_{i,o}}{\partial x} + \frac{1}{x^2} \frac{\partial^2 T_{i,o}}{\partial \Theta^2} \right), i=1-3. \quad (39)$$

$$C_4 \rho_4 \frac{\partial T_4}{\partial \tau} = \lambda_4 \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2} \right). \quad (40)$$

$$T_i = T_n = \text{const}, i=1-4, \tau=0. \quad (41)$$

$$T_{1,n} = T_n = \text{const}, 0 < \tau \leq \tau_{oc}; \quad (42)$$

$$T_{1,o} = T_o = \text{const}, 0 < \tau \leq \tau_{oc}, \quad (43)$$

$$\frac{\partial T_{1,n}}{\partial x} = 0, \tau_{oc} < \tau \leq \tau_0, \quad (44)$$

$$\frac{\partial T_{1,o}}{\partial x} = 0, \tau_{oc} < \tau \leq \tau_0. \quad (45)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_{i,n}}{\partial x} = \lambda_j \frac{\partial T_{j,n}}{\partial x}, T_{i,n} = T_{j,n}, i,j=1-4; i \neq j; \tau > 0; \quad (46)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_{i,n}}{\partial y} = \lambda_j \frac{\partial T_{j,n}}{\partial y}, T_{i,n} = T_{j,n}, i,j=1-4; i \neq j; \tau > 0; \quad (47)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_{i,o}}{\partial x} = \lambda_j \frac{\partial T_{j,o}}{\partial x}, T_{i,o} = T_{j,o}, i,j=1-4; i \neq j; \tau > 0; \quad (48)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_{i,o}}{\partial y} = \lambda_j \frac{\partial T_{j,o}}{\partial y}, T_{i,o} = T_{j,o}, i,j=1-4; i \neq j; \tau > 0; \quad (49)$$

$$\frac{\partial T_{i,n}}{\partial \Theta} = 0, i=1-3; \tau > 0; \quad (50)$$

$$\frac{\partial T_{i,o}}{\partial \Theta} = 0, i=1-3; \tau > 0; \quad (51)$$

$$\frac{\partial T_4}{\partial x} = 0, \text{ при } x = \pm a, \tau > 0. \quad (52)$$

$$-\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} = \alpha (T_{4,b} - T_5(\tau)), \text{ при } y=0, \tau > 0. \quad (53)$$

$$\frac{\partial T_4}{\partial y} = 0, \text{ при } y=b, \tau > 0, \quad (54)$$

$$T_5(\tau) = A \sin(\pi\tau/\tau_0).$$

Обозначения: τ_{oc} – длительность отопительного периода, с; τ_0 – время расчета, с; A – амплитуда колебания температуры наружного воздуха, К; 1–4 – номера облас-

тей расчета (рисунок 8); 5 – окружающая среда; п, о – подающий и обратный трубопроводы; н – начальный момент времени; в – верхняя граница.

На рисунке 9 приведена типичная зависимость тепловых потерь от времени. Исследования проводились для промежутка времени равного пяти годам эксплуатации тепловой сети.

Результаты численного моделирования, приведенные на рисунке 9, свидетельствуют об ожидаемом циклическом изменении тепловых потерь в зависимости от значений температур наружного воздуха при фиксированных температурах теплоносителей в трубах (количественное регулирование тепловой нагрузки).

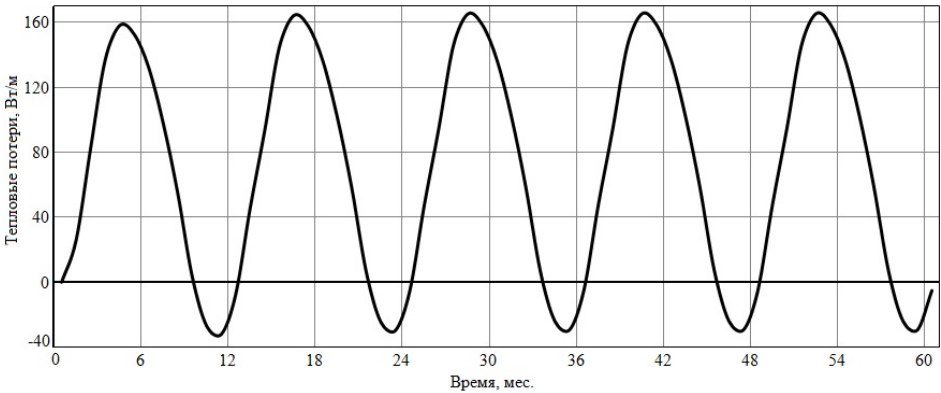


Рисунок 9 – Изменение тепловых потерь теплопровода во времени

Максимальный диапазон изменения тепловых потерь рассматриваемой системы составляет 197,71 Вт/м от 165,54 Вт/м в декабре и до минус 32,17 Вт/м в июле. «Отрицательные» тепловые потери (теплоприток) наблюдаются в летний период и объясняются отсутствием теплового потока от трубопроводов в межотопительный период и нагревом грунта от внешней среды.

Анализ результатов численного моделирования позволяет сделать вывод о том, что начальные условия эксплуатации подземных бесканальных трубопроводов оказывают влияние на тепловые потери только в первый год работы тепловой сети и могут быть исключены из рассмотрения при прогностическом моделировании длительных периодов эксплуатации подземных трубопроводов.

Вопрос об оценке достоверности полученных результатов требует дополнительного рассмотрения, так как в последнее время отмечаются многочисленные некачественные, существенно завышенные оценки масштабов тепловых потерь.

В работе [Vøhm V. Experimental determination of heat losses from buried district heating pipes in normal operation // Heat Transfer Engineering. – 2001. – V. 22. – №. 3. – P. 41–51.] приведены результаты экспериментального определения тепловых потерь подземных теплопроводов, эксплуатируемых в штатных условиях. Результаты этих экспериментов приведены на рисунке 10 (доверительный интервал составлял $\pm 20\%$).

Для исходных данных и конфигурации теплопровода, описанных в экспериментах, с использованием предлагаемых в диссертации подходов произведен расчет температурного поля на поверхности грунта в зоне размещения подземного теплопровода. Результаты этого расчета также представлены на рисунке 10. Сопоставле-

ние результатов численного моделирования и экспериментального определения температур поверхности грунта в зоне размещения подземного теплопровода в фиксированных точках позволяет сделать вывод о хорошем качественном и количественном согласовании результатов.

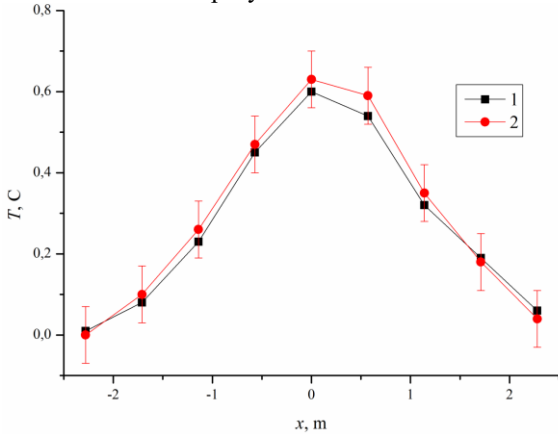


Рисунок 10 – Сопоставление результатов численного моделирования и экспериментального определения температур поверхности грунта в зоне размещения подземного теплопровода:

1 – расчеты с использованием предлагаемых в диссертации подходов;

2 – результаты экспериментов

В третьей главе рассматриваются процессы сопряженного теплопереноса в конструкциях и зонах размещения канальных теплопроводов тепловых сетей в различных условиях эксплуатации (штатных, внештатных, аварийных).

Известно, что наиболее распространенным видом прокладки тепловых сетей в РФ является двухтрубная прокладка трубопроводов.

Тепловые режимы и тепловые потери двухтрубных подземных канальных тепловых сетей исследовались на примере типичных для сетей теплоснабжения РФ конфигурации теплопроводов подземной прокладки – непроходной невентилируемый железобетонный канал и трубопроводы (подающий и обратный) изолированные МВ и защитным покровным слоем (рисунок 11).

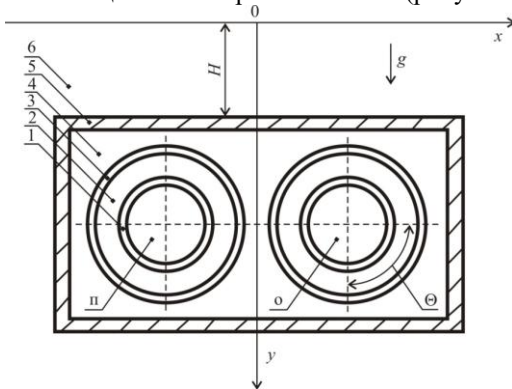


Рисунок 11 – Схема области решения: 1 – труба; 2 – тепловая изоляции; 3 – покровный слой; 4 – полость канала; 5 – стенка канала; 6 – грунт; п – подающий трубопровод; о – обратный трубопровод

Математическая постановка задачи для этого примера будет описываться: для воздуха в полости канала уравнениями энергии, движения и неразрывности:

$$c\rho\left(w_x\frac{\partial T_4}{\partial x}+w_y\frac{\partial T_4}{\partial y}\right)=\lambda\left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2}\right), \quad (55)$$

$$w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} \right), \quad (56)$$

$$w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} \right) + g\beta(T_4 - T_7), \quad (57)$$

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} = 0; \quad (58)$$

в тепловой изоляции и покровном слое для подающего и обратного трубопроводов уравнениями теплопроводности в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial^2 T_{i,n}}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial T_{i,n}}{\partial x} + \frac{1}{x^2} \frac{\partial^2 T_{i,n}}{\partial \Theta^2} = 0, \quad i=2, 3, \quad (59)$$

$$\frac{\partial^2 T_{i,o}}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial T_{i,o}}{\partial x} + \frac{1}{x^2} \frac{\partial^2 T_{i,o}}{\partial \Theta^2} = 0, \quad i=2, 3; \quad (60)$$

в стенах канала и грунте уравнениями теплопроводности в декартовой системе координат:

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} = 0, \quad i=5, 6. \quad (61)$$

При постановке задачи принималось, что на внутренних поверхностях тепловой изоляции подающего и обратного трубопроводов поддерживается постоянная температура, равная температуре теплоносителя в трубе:

$$T_{2,n} = T_n = \text{const}, \quad (62)$$

$$T_{2,o} = T_o = \text{const}. \quad (63)$$

На границе раздела «грунт – окружающая среда» осуществляются условия конвективного теплообмена:

$$-\lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial y} = \alpha(T_6 - T_7). \quad (64)$$

В местах соприкосновения слоев реализуются условия идеального теплового контакта:

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} = \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial x}, \quad T_i = T_j, \quad i, j=4, 5, 6, \quad i \neq j, \quad (65)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} = \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial y}, \quad T_i = T_j, \quad i, j=4, 5, 6, \quad i \neq j, \quad (66)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_{i,n}}{\partial x} = \lambda_j \frac{\partial T_{j,n}}{\partial x}, \quad T_i = T_j, \quad i, j=2, 3, \quad i \neq j, \quad (67)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_{i,n}}{\partial y} = \lambda_j \frac{\partial T_{j,n}}{\partial y}, \quad T_i = T_j, \quad i, j=2, 3, \quad i \neq j, \quad (68)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_{i,o}}{\partial x} = \lambda_j \frac{\partial T_{j,o}}{\partial x}, \quad T_i = T_j, \quad i, j=2, 3, \quad i \neq j, \quad (69)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_{i,o}}{\partial y} = \lambda_j \frac{\partial T_{j,o}}{\partial y}, \quad T_i = T_j, \quad i, j=2, 3, \quad i \neq j. \quad (70)$$

На поверхностях раздела «покровный слой – полость канала» для подающего и обратного трубопроводов учтен теплообмен излучением:

$$\lambda_3 \frac{\partial T_{3,n}}{\partial x} = \lambda_4 \frac{\partial T_{4,n}}{\partial x} + \varepsilon_{np} \sigma [T_{4,n}^4 - T_5^4], \quad T_{3,n} = T_{4,n}, \quad (71)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial T_{3,o}}{\partial x} = \lambda_4 \frac{\partial T_{4,o}}{\partial x} + \varepsilon_{np} \sigma [T_{4,o}^4 - T_5^4], \quad T_{3,o} = T_{4,o}. \quad (72)$$

Для тепловой изоляции и покровного слоя подающего и обратного трубопроводов выполняются условия симметрии:

$$\frac{\partial T_{i,n}}{\partial \Theta} = 0, \quad i=2, 3, \quad (73)$$

$$\frac{\partial T_{i,o}}{\partial \Theta} = 0, \quad i=2, 3. \quad (74)$$

На достаточно большом расстоянии от теплопровода (рис. 11) градиенты температур в грунте равны нулю:

$$\frac{\partial T_6}{\partial x} = 0, \quad x \rightarrow \pm\infty, \quad (75)$$

$$\frac{\partial T_6}{\partial y} = 0, \quad y \rightarrow -\infty. \quad (76)$$

Скорость движения воздуха в полости канала (рисунок 11) на внешней поверхности покровных слоев подающего и обратного трубопроводов, а также на внутренней поверхности стенок канала равна нулю (условия прилипания):

$$w_x = w_y = 0. \quad (77)$$

Обозначения: w_x, w_y – составляющие скорости в проекции на оси координат, м/с; ν – кинематическая вязкость, м²/с; g – ускорение силы тяжести, м/с²; β – коэффициент температурного расширения, К⁻¹; ε – степень черноты; σ – постоянная Стефана – Больцмана, Вт/(м²·К⁴); 1–6 – номера областей расчета (рисунок 11); 7 – окружающая среда; пр – приведенный.

Температуры внутренних поверхностей слоев тепловой изоляции подающего и обратного трубопроводов приняты равными $T_{п}=363$ К и $T_{о}=323$ К. Температура окружающей среды принималась равной $T_7=264,2$ К. Значение коэффициента теплоотдачи от грунта к окружающей среде составляло $\alpha=5$ Вт/(м²·К).

В таблице 13 приведены величины тепловых потерь рассматриваемого теплопровода с учетом и без учета теплового излучения в полости канала.

Таблица 13 – Результаты расчета тепловых потерь

Вариант расчета	Без учета теплового излучения	С учетом теплового излучения	СНиП 41-03-2003
Тепловые потери, Вт/м	213,36	262,54	209,01

Анализ результатов (таблица 13) позволяет сделать следующие выводы:

1. Учет теплообмена излучением в полости канала теплопровода приводит к увеличению тепловых потерь на 18,73 %;

2. Расхождение между результатами расчетов, проведенными с использованием модели (55)–(77) и по СНиП 41-03-2003, составляет 20,39 %, что подтверждает необходимость перехода к сопряженным постановкам задач при проведении исследований тепловых режимов и тепловых потерь систем транспортировки тепла и необходимость корректировки действующих правил по проектированию тепловой изоляции канальных трубопроводов.

На рисунке 12 приведено типичное температурное поле грунта в зоне прокладки двухтрубного теплопровода.

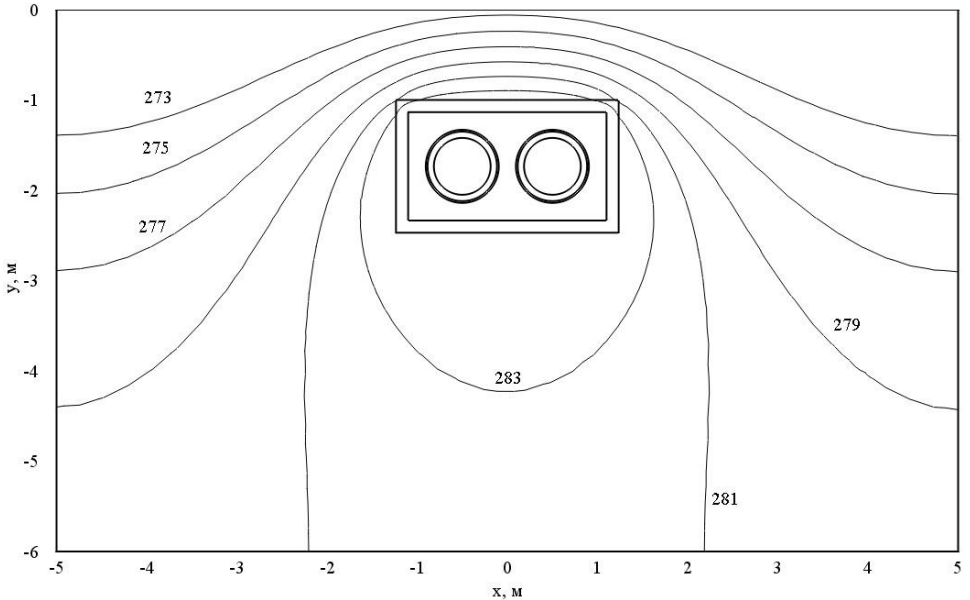


Рисунок 12 – Температурное поле грунта в зоне прокладки теплопровода, К

Структура течения воздуха (рисунок 13) в полости канала двухтрубного теплопровода является достаточно сложной, состоит из основного циркуляционного течения и нескольких вторичных вихрей. По результатам численного моделирования установлено, что максимальная скорость движения воздуха в полости канала двухтрубного теплопровода не превышает 0,05 м/с и определяется величиной подъемной силы.

Наиболее характерными внештатными режимами работы теплопроводов являются их эксплуатация без тепловой изоляции и в условиях затопления. Для этих случаев рассматривается типичная для РФ конфигурация теплопровода подземной прокладки – непроходной железобетонный одноячейковый канал и теплопровод.

Математическое описание рассматриваемых задач базируется на описанных выше подходах к анализу тепловых режимов систем транспортировки тепла.

Рассматривался типичный для тепловых сетей РФ сборный одноячейковый железобетонный канал марки КЛс120-120 с толщиной стенок 135 мм и трубопровод с диаметром условного прохода 600 мм. Расстояние от поверхности грунта до верхней части канала составляло 1 метр. Температура внутренней поверхности трубы принималась равной 373 К, а температура внешней среды составляла – 273 К. Ко-

эffициент теплоотдачи от грунта к внешней среде принимался равным $15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Расчетное значение приведенной степени черноты составляло $\varepsilon = 0.79$.

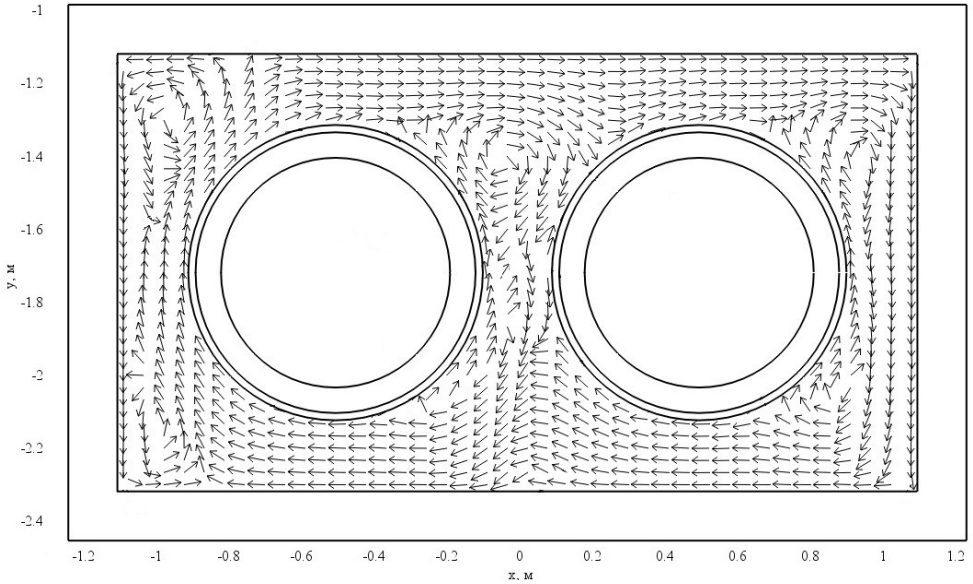


Рисунок 13 – Структура течения воздуха в полости канала теплопровода

В таблице 14 приведены результаты расчета тепловых потерь теплопровода, работающего без тепловой изоляции Q_3 , эксплуатируемого в условиях затопления при максимальном влагонасыщении изоляционных слоев Q_2 , тепловые потери Q_1 , вычисленные в соответствии со СНиП 41-03-2003 и тепловые потери Q_0 , рассчитанные для варианта, когда в полости канала воздух с относительной влажностью 100 %.

Результаты моделирования (таблица 14) позволили сделать следующие выводы: сопоставление между собой значений Q_0 и Q_1 показывает, что расхождение между ними не превышает 4 %;

для рассматриваемого случая рост тепловых потерь теплопровода в условиях затопления составляет 64.3 %;

тепловые потери теплопровода, эксплуатируемого без тепловой изоляции, превышают проектные на 73.35 %.

Таблица 14 – Результаты численного моделирования

Вариант расчета	Q_0	Q_1	Q_2	Q_3
Тепловые потери, Вт/м	132.29	127.43	370.66	496.39
Средняя температура в полости канала, К	298.8	298.4	343.5	371.1
Отклонение тепловых потерь от Q_0 , %	0	3.67	64.31	73.35

На основании результатов численного анализа тепловых потерь, сделан вывод о том, что наибольший рост тепловых потерь на тепловых сетях, работающих в аварийных режимах, имеет место при эксплуатации теплопроводов без тепловой изоляции.

Анализ достоверности результатов численного моделирования сопряженного теплопереноса в конструкциях и зонах размещения канальных теплопроводов теп-

ловых сетей выполнен с использованием экспериментальных данных Витальева В.П. (рисунок 14).

В работе Витальева В.П. при описании лабораторного стенда приведены не все его параметры (нет сведений о толщине стенок канала и геометрических параметрах области занятой грунтом). По этой причине провести детализированное количественное сопоставление результатов экспериментальных исследований и численного моделирования не возможно. Однако анализ рисунка 14 позволяет сделать вывод об отличном качественном согласовании результатов эксперимента и предлагаемого в диссертации подхода к анализу тепловых режимов каналных теплопроводов.

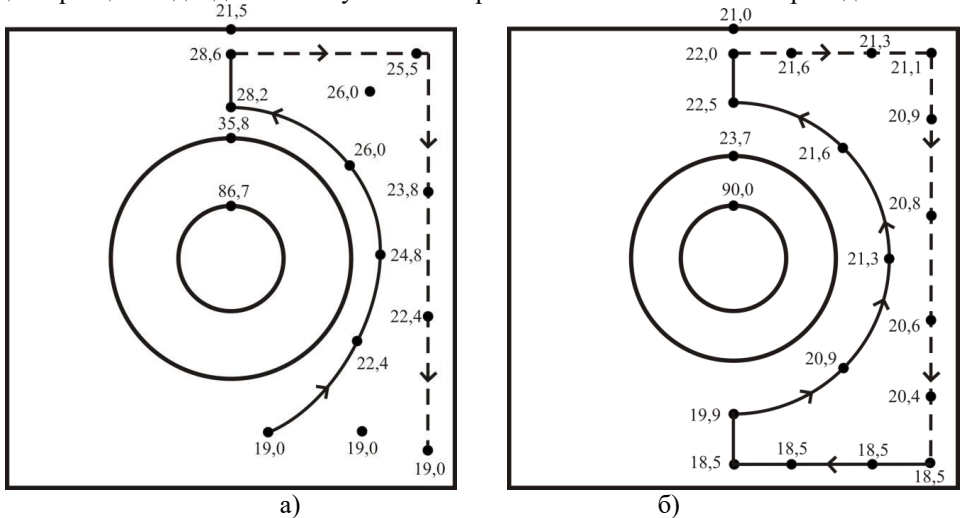


Рисунок 14 – Распределение температур в полости канала, °С:

- а) Витальев В.П. Исследование режимов высыхания изоляции подземных теплопроводов // Сборник наладочных и экспериментальных работ ОРГРЭС. – 1955. – Вып. XI. – С. 36–49.;
 б) расчеты с использованием предлагаемых в диссертации подходов

В четвертой главе отражены результаты численного моделирования тепломассопереноса в пористой структуре увлажненной низкотемпературной атмосферной тепловой изоляции. В этом случае рассматривался типичный резервуар для хранения криожидкостей. Для тепловой изоляции резервуара решается одномерная нестационарная задача теплопроводности и диффузии с учётом фазовых переходов и зависимости свойств изоляции от объёмной доли влаги. Схема области решения представлена на рисунке 15. В качестве примера рассматривался объект для хранения сжиженного газа диаметром $d = 2400$ мм. Тепловая изоляция – шлаковая вата и полистирол ПС-1 толщиной 50 мм. Температура внутренней границы R_1 равна температуре криожидкости $T_{ж} = 230$ К. Температура окружающей среды составляла $T_{\infty} = 290-300$ К, относительная влажность $\varphi = 60-100\%$, начальная объёмная влажность изоляции $W_0 = 1\%$. Коэффициент теплоотдачи составлял $\alpha = 5,8$ Вт/(м²·К), сопротивление влагообмену у поверхности изоляции принималось равным $R_{в.п} = 96$ (МПа·с·м²)/кг, коэффициент диффузии влаги в полистироле ПС-1 $D = 2 \cdot 10^{-6}$ м²/ч, в шлаковой вате $D = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м²/ч.

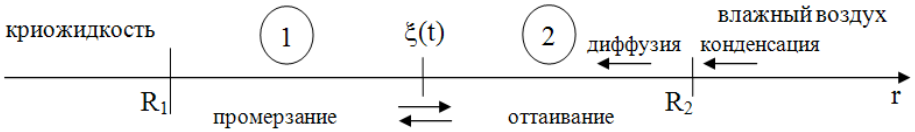


Рисунок 15 – Схематическое изображение области решения:
1 – зона промерзшей изоляции, 2 – зона увлажненной изоляции

Математическая постановка задачи имеет вид:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_{\text{эф1}} \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right), \quad R_1 < r < \xi(t), \quad t > 0; \quad (78)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_{\text{эф2}} \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} \right), \quad \xi(t) < r < R_2, \quad t > 0; \quad (79)$$

$$\frac{\partial W_2}{\partial t} = D_2 \left(\frac{\partial^2 W_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W_2}{\partial r} \right), \quad \xi(t) < r < R_2, \quad t > 0. \quad (80)$$

$$T = T_0, \quad R_1 \leq r \leq R_2, \quad t = 0; \quad (81)$$

$$W = W_0, \quad R_1 \leq r \leq R_2, \quad t = 0. \quad (82)$$

$$T_1 = T_{\text{ж}}, \quad r = R_1, \quad t > 0; \quad (83)$$

$$-\lambda_{\text{эф2}} \frac{\partial T_2}{\partial r} = \alpha (T_2 - T_{\text{ос}}) - j \cdot \Gamma_{\text{пар}}, \quad r = R_2, \quad t > 0; \quad (84)$$

$$-D_2 \frac{\partial W_2}{\partial r} = \beta (W_2 - W_{\text{ос}}), \quad r = R_2, \quad t > 0; \quad (85)$$

$$\frac{\partial W_2}{\partial r} = 0, \quad r = \xi(t), \quad t > 0; \quad (86)$$

$$\lambda_{\text{эф1}} \frac{\partial T_1}{\partial r} - \lambda_{\text{эф2}} \frac{\partial T_2}{\partial r} = \overline{W} \Gamma_{\text{пл}} \bar{\rho} \frac{d\xi}{dt}, \quad (87)$$

$$T_1 = T_2 = T_{\text{пл}}, \quad r = \xi(t), \quad t > 0.$$

Обозначения: $\bar{\rho}$ – средняя плотность, кг/м³; \overline{W} – среднее относительное влаго-содержание изоляции по объёму; β – коэффициент массоотдачи, м/с; 1, 2 – промерзшая и увлажнённая зоны изоляции; л – лёд.

В научно-технической литературе отсутствуют какие-либо данные по исследованию процессов тепловлагопереноса в низкотемпературной тепловой изоляции с учетом фазовых переходов и взаимодействия с окружающей средой. Поэтому обоснованность и достоверность результатов исследований следует из проведенных проверок используемых методов на сходимость и устойчивость решений на множестве сеток и выполнения условий баланса энергии δ_2 (таблица 15) на границах области расчета. Погрешность по балансу энергии δ_2 во всех вариантах численного анализа не превышала 0,5 %. При использовании метода ловли фронта в узел пространственной сетки величина шага по времени зависит от температуры и шага по координате и вычисляется на каждой итерации временного цикла.

Таблица 15 – Зависимость погрешности вычисления баланса энергии от количества узлов пространственной сетки ($T_{oc} = 300 \text{ K}$; $\varphi = 100 \%$)

Количество узлов сетки, шт	h , мм	Изоляция	δ_2 , %
50	1,00	шлаковая вата	6,06
		полистирол ПС-1	4,74
100	0,50	шлаковая вата	2,02
		полистирол ПС-1	1,86
500	0,10	шлаковая вата	0,36
		полистирол ПС-1	0,26
5000	0,01	шлаковая вата	0,08
		полистирол ПС-1	0,11

При проведении численных экспериментов было установлено, что из условия обеспечения выбранной точности вычислений ($\delta_2 < 0,5 \%$) шаг по координате должен быть не более $h = 0,1$ мм (таблица 15), а количество итераций на каждом временном слое составляет от 3 до 32.

В таблице 15 приведены некоторые типичные результаты численных экспериментов по анализу сеточных параметров. Анализ данных, приведенных в таблице 15, позволяет сделать ожидаемый вывод об уменьшении погрешности по балансу энергии δ_2 с увеличением количества узлов пространственной сетки.

В таблицах 16,17 приведены теплопритоки к резервуару с учетом q_1 и без учета q_2 промерзания тепловой изоляции, сравнение этих величин между собой δ_1 , а также толщина слоя промерзшей изоляции δ , объемное содержание влаги в воздухе W_{oc} и время выхода процессов на стационарный режим $t_{ст}$.

Таблица 16 – Результаты моделирования для шлаковой ваты

T_{oc} , К	φ , %	q_1 , Вт/м	q_2 , Вт/м	W_{oc} , %	δ , мм	δ_1 , %	δ_2 , %	$t_{ст}$, ч
290	60	500,7	343,3	1,14	45,0	31,4	0,49	1,5
	80	512,6		1,53	44,1	33,0	0,34	2,1
	100	524,9		1,91	43,1	34,6	0,30	2,3
295	60	538,7	371,9	1,56	41,8	31,0	0,50	1,8
	80	557,5		2,09	40,6	33,3	0,30	2,5
	100	572,7		2,61	39,3	35,1	0,45	2,7
300	60	582,0	400,5	2,11	38,7	31,2	0,35	2,1
	80	606,1		2,82	37,1	33,9	0,46	2,7
	100	633,0		3,54	35,6	36,7	0,36	3,5

Таблица 17 – Результаты моделирования для полистирола ПС-1

T_{oc} , К	φ , %	q_1 , Вт/м	q_2 , Вт/м	W_{oc} , %	δ , мм	δ_1 , %	δ_2 , %	$t_{ст}$, ч
290	60	447,6	282,6	1,14	44,7	36,9	0,36	21
	80	456,7		1,53	43,7	38,1	0,28	52
	100	466,8		1,91	42,7	39,5	0,25	56
295	60	479,7	306,1	1,56	41,6	36,2	0,34	72
	80	492,2		2,09	40,2	37,8	0,31	130
	100	511,0		2,61	39,0	40,1	0,36	138
300	60	516,7	329,7	2,11	38,5	36,2	0,24	149
	80	539,1		2,82	36,8	38,8	0,34	248
	100	563,4	329,7	3,54	35,2	41,5	0,26	309

Результаты расчета потерь холода, свидетельствуют о том, что увлажнение и последующее промерзание слоя тепловой изоляции приводят к росту потерь холода до $\delta l = 36,7\%$ для шлаковой ваты и до $\delta l = 41,5\%$ для полистирола ПС-1. Соотношение величин q_1 и q_2 , позволяет утверждать о том, что при эксплуатации резервуаров для хранения криожидкостей даже при относительно невысоких значениях T_{oc} и φ возможно существенное увеличение теплопритоков. Следует отметить, что толщина слоя промерзшей тепловой изоляции имеет максимальное значение $\delta = 45,0$ мм для шлаковой ваты и $\delta = 44,7$ мм для полистирола ПС-1, что соответствует практически полному промерзанию теплоизоляции.

Анализ нестационарности процессов теплопереноса позволяет сделать вывод о том, что длительность выхода на стационарный режим находится в диапазоне $t_{ct} = 1,5 - 3,5$ часа для шлаковой ваты. К тому же наиболее интенсивный рост теплопритоков к резервуару (рисунок 16) наблюдается в течение первого часа эксплуатации, что существенно ниже типичного времени хранения криожидкостей.

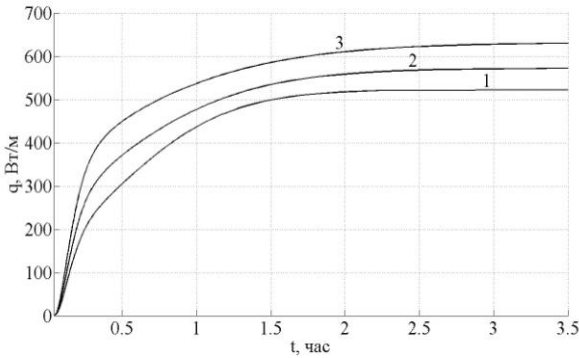


Рисунок 16 – Зависимость теплопритоков к резервуару от времени для шлаковой ваты при $\varphi = 100\%$ и T_{oc} :
1) 290 К, 2) 295 К, 3) 300 К

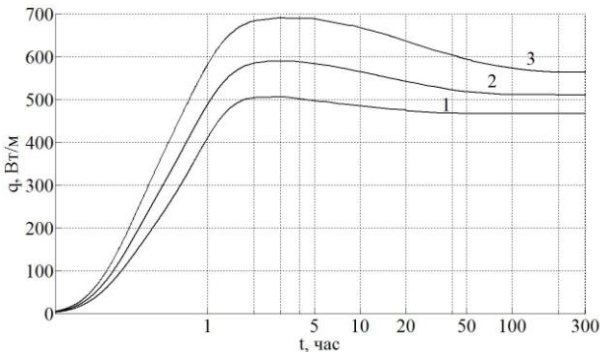


Рисунок 17 – Зависимость теплопритоков к резервуару от времени для полистирола ПС-1 при $\varphi = 100\%$ и T_{oc} :
1) 290 К, 2) 295 К, 3) 300 К

Анализ нестационарности процессов переноса для аппарата с изоляцией из полистирола ПС-1 свидетельствует о том, что длительность выхода на стационарный режим находится в диапазоне $t_{ct} = 21 - 309$ часов. Следует отметить, что процессы теплопереноса во влагуостойчивом материале несут существенно нестационарный характер, а изменение величины теплопритоков во времени (рисунок 17) можно описать следующим образом. В течение первых 2-4 часов наблюдается резкое повышение потерь холода, а затем, по мере установления стационарного режима, величина тепловых притоков к резервуару снижается

вплоть до постоянного значения q_1 . Интенсификация потерь холода в начальный временной промежуток объясняется тем, что в этот период времени происходит «быстрая» кристаллизация (замерзание) начальной влаги W_0 , содержащейся в тепловой изоляции. Последующее снижение теплопотоков связано с конденсацией влаги из влажного воздуха на внешней границе рассматриваемой системы, диффузией конденсата в структуру слоя тепловой изоляции и плавлением льда.

Эти обстоятельства подтверждают необходимость учета нестационарности процессов переноса, промерзания тепловой изоляции и наличие миграции влаги к фронту фазового перехода при анализе режимов работы резервуаров для хранения криожидкостей, имеющих влагоустойчивую тепловую изоляцию.

Низкотемпературные трубопроводы являются частью системы загрузки на любом заводе по производству СПГ. Условие периодической эксплуатации – это особенность работы системы загрузки СПГ. Анализ возможности разрушения изоляции низкотемпературных трубопроводов рассматривался на примере системы транспортировки криожидкостей, а долговечность оценивалась по формуле (37). Математическая модель для этого случая имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (88)$$

$$\sigma(r, \tau) = \frac{\alpha_p \cdot E}{1-\nu} \left[\frac{1}{\delta} \int_0^\delta T(r, \tau) dx - T(r, \tau) \right]. \quad (89)$$

$$T = T_{\text{нач}} = \text{const}, \quad R_1 \leq r \leq R_2, \quad \tau = 0. \quad (90)$$

$$r = R_1, \quad T = T_{\text{ж}} = \text{const}, \quad \tau > 0, \quad (91)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha(T - T_{\text{ос}}), \quad r = R_2, \quad \tau > 0. \quad (92)$$

Обозначения: R – граница области расчета; T – температура, К; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; τ – время, с; r – координата, м; k – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга, Мпа; α_p – коэффициент линейного температурного расширения, К^{-1} ; нач – начальный момент времени; 1, 2 – номера границ области расчета; ос – окружающая среда; ж – криогенная жидкость.

В качестве примера рассматривается низкотемпературный трубопровод, по которому транспортируется СПГ при температуре $T_{\text{ж}} = -161^\circ\text{C}$. Диаметр трубопровода 400 мм. Толщина изоляции $\delta = 280$ мм. Тепловая изоляция – ППУ.

В таблице 18 приведены результаты анализа долговечности пенополиуретановой изоляции при изменении температуры окружающей среды.

Таблица 18 – Результаты анализа долговечности ППУ изоляции

$T_{\text{ос}}, \text{К}$	308	298	283	263
$\sigma_{\text{max}}, \text{Па}\cdot 10^4$	1,74	1,70	1,64	1,57
$\tau(\sigma), \text{год}$	127,4	476,1	$3,90\cdot 10^3$	$84,2\cdot 10^3$

Анализ результатов, приведенных в таблице 18, дает возможность говорить о сокращении срока службы изоляционного материала с повышением температуры окружающей среды. Однако во всех случаях значения долговечности не являются

критическими и существенно превышают нормативный срок службы тепловой изоляции (30 лет).

Пятая глава посвящена анализу тепловых режимов резервуаров для хранения энергоносителей (хранилища мазута и сжиженных природных газов).

В настоящее время неоднократно отмечалось, что действующие правила по расчету тепловых потерь не учитывают многих реальных особенностей эксплуатации мазутохранилищ, поскольку основаны на существенно упрощенных подходах к анализу тепловых режимов рассматриваемых систем.

При проведении численного анализа тепловых потерь резервуаров для хранения топлив рассматривались вертикальные цилиндрические стальные резервуары марки РВС–100 в наземном, полуподземном и подземном исполнениях. На рисунке 18, в качестве примера, показана схема области решения для наземного резервуара.

Для рассматриваемых объектов решаются двумерные нестационарные задачи теплопроводности в системе «резервуар для хранения топлива – окружающая среда». Предполагается, что в начальный момент времени температура в рассматриваемой области решения равна температуре окружающей среды. На внутренней поверхности резервуара по всему периметру выставляются граничные условия первого рода, а на внешнем контуре рассматриваемой системы – граничные условия третьего рода. Также предполагается, что на достаточно большом расстоянии от резервуара градиенты температур в грунте равны нулю.

Средняя температура хранения топлива принята постоянной и равна $T_{in}=70^{\circ}\text{C}$. Значение коэффициента теплоотдачи принималось равным $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Температуры наружного воздуха T_{ex} приняты в соответствии со среднемесячными температурами для г.Томск.

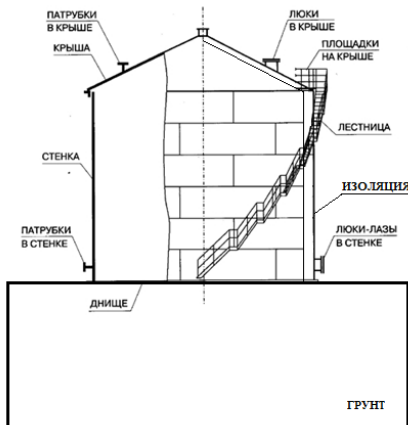


Рисунок 18 – Схема наземного вертикального стального цилиндрического резервуара

На рисунке 19, в качестве примера, представлены изменения тепловых потерь подземного резервуаров в течение пяти лет эксплуатации.

Результаты моделирования тепловых потерь резервуаров для хранения топлив свидетельствуют об ожидаемом росте тепловых потерь, со снижением температуры окружающей среды. Предельные отклонения между самым холодным (январь) и самым теплым (июль) месяцами составляют около 42 % для наземного резервуара,

33 % для полуподземного резервуара и 24 % для резервуара в подземном исполнении. Наибольшие потери наблюдаются для надземных резервуаров, а наименьшие – для подземных. Это обстоятельство объясняется тем, что надземные резервуары имеют наибольшую площадь контакта с окружающей средой, а подземные – наименьшую.

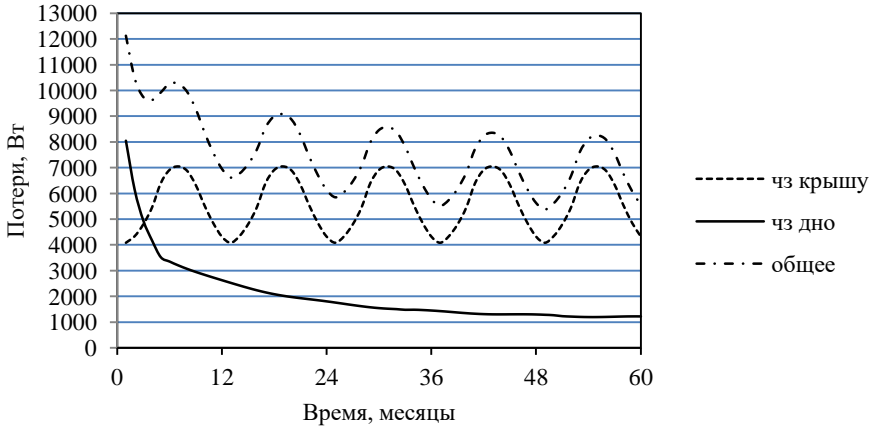


Рисунок 19 – Изменение тепловых потерь подземного резервуара

Сопоставление результатов численного моделирования с величиной тепловых потерь, рассчитанных с использованием нормативной методики, позволяет говорить о том, что отклонение между ними является существенным. В предельных случаях отклонения между результатами численного моделирования и данными нормативного расчета составляет около 5 % для надземного резервуара, 11 % для полуподземного резервуара и 14 % для резервуара в подземном исполнении.

Анализ нестационарности процессов теплопереноса позволяет сделать вывод о том, что влияние начальных условий практически не сказывается на тепловые режимы надземных резервуаров, заметно влияют на режимы работы полуподземных резервуаров (время стабилизации теплового режима составляет около одного года) и существенно воздействуют на распределение температур в зоне размещения подземного резервуара (время стабилизации теплового режима – около четырех лет).

Разработанные подходы к анализу тепловых режимов систем транспортировки и хранения энергоносителей, описанные в диссертации, позволяют использовать их в различных приложениях. В качестве примера можно рассмотреть задачу о влиянии локального пожара на интенсификацию процессов теплопереноса в конструкциях и объеме надземного резервуара для хранения СПГ.

Рассматривается изотермический надземный резервуар для хранения СПГ. На рисунке 20 приведено схематическое изображение области решения рассматриваемой задачи.

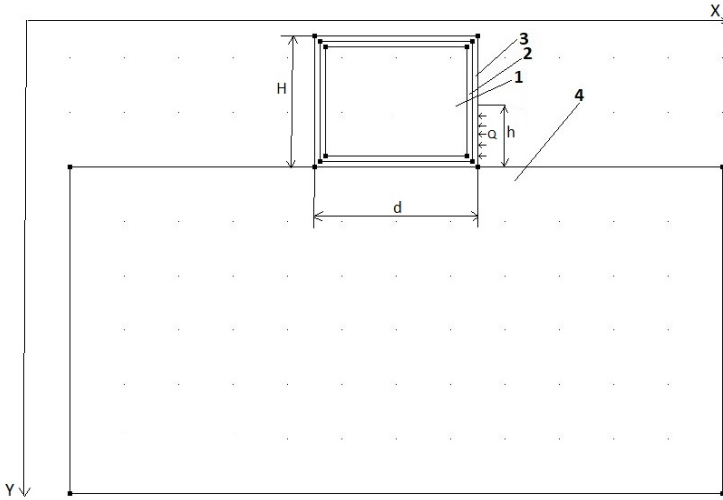


Рисунок 20 – Схематическое изображение области решения:
 1 – сжиженный метан; 2 – внутренняя оболочка резервуара; 3 – внешняя оболочка резервуара, 4 – грунт, d – диаметр резервуара; H – высота резервуара; h – область действия локального пожара

Процесс переноса тепла в рассматриваемой области решения описывается для сжиженного метана - уравнениями энергии, движения и неразрывности:

$$C_1 \rho_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial T_1}{\partial x} + w_y \frac{\partial T_1}{\partial y} \right) = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right), \quad (93)$$

$$\frac{\partial w_x}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu_1 \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} \right), \quad (94)$$

$$\frac{\partial w_y}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu_1 \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} \right) + g \beta_1 (T - T_5), \quad (95)$$

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial \tau} + \rho_1 \frac{\partial w_x}{\partial x} + \rho_1 \frac{\partial w_y}{\partial y} = 0. \quad (96)$$

В стенках резервуара уравнениями теплопроводности в цилиндрической системе координат:

$$C_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} \right), \quad i = 2, 3. \quad (97)$$

В грунте уравнениями теплопроводности для декартовой системы координат:

$$C_4 \rho_4 \frac{\partial T_4}{\partial \tau} = \lambda_4 \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2} \right). \quad (98)$$

В начальный момент времени распределение температур и скоростей в рассматриваемой области решения являются функциями координат и получены из решения стационарных вариантов решения задачи:

$$\begin{aligned} \tau = 0, \quad T &= f(x, y), \\ w &= f(x, y). \end{aligned} \quad (99)$$

Скорость движения газовой среды на внутренней поверхности стенок резервуара СПГ равна нулю (условия прилипания):

$$w_1 = 0. \quad (100)$$

На границе контакта грунта с окружающей средой выставляются граничные условия третьего рода:

$$\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} = \alpha(T_5 - T_4). \quad (101)$$

На границе контакта резервуара с окружающей средой:

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} = \alpha(T_5 - T_3); \quad (102)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} = \alpha(T_5 - T_3), \quad y \notin h; \quad (103)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} = \alpha(T_5 - T_3) + Q, \quad y \in h. \quad (104)$$

В местах соприкосновения слоев реализуются условия идеального теплового контакта:

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} = \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial x}, \quad T_i = T_j, \quad i, j = 1-4, i \neq j, \quad (105)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} = \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial y}, \quad T_i = T_j, \quad i, j = 1-4, i \neq j. \quad (106)$$

На достаточно большом расстоянии от резервуара градиенты температур в грунте равны нулю:

$$\frac{\partial T_4}{\partial x} = 0, \quad x \rightarrow \pm\infty, \quad (107)$$

$$\frac{\partial T_4}{\partial y} = 0, \quad y \rightarrow -\infty. \quad (108)$$

В качестве примера рассматривается изотермический резервуар сжиженного метана диаметром 15180 мм и высотой 12000 мм. В качестве изоляционного материала выбран засыпной перлит. Внешняя оболочка изготовлена из преднапряженного железобетона. Температура внутренней оболочки равна температуре метана в резервуаре $T_{ж}=111$ К. Температура окружающей среды $T_{oc}=293$ К. Коэффициент теплоотдачи составлял 5 Вт/(м²·К).

Высота h (рисунок 20) принималась равной 6 метров. Причем предполагалось, что зона действия локального пожара составляет половину диаметра резервуара. Такой сценарий развития локального пожара, может наблюдаться, например, при разливе горючих веществ в зоне размещения рассматриваемого объекта.

Время расчета принималась равным $\tau = 10$ минут как максимальное время до прибытия пожарной бригады к месту ликвидации пожара.

Величина теплового потока от локального пожара в зоне размещения резервуара принималась равной $Q=3-9 \cdot 10^3$ Вт/м².

В таблице 19 приведены результаты исследования увеличения потерь холода Q_1 резервуаром для хранения СПГ в зависимости от значений теплового потока, действующего от локального пожара в зоне его размещения.

Таблица 19 – Результаты численного анализа теплопритоков к резервуару СПГ

Q , Вт/м ²	0	3000	4500	9000
Q_1 , Вт/м ²	-218	-1795	-2458	-4693

Анализ данных, приведенных в табл. 19, позволяет сделать ожидаемый вывод о том, что увеличение теплового потока от локального пожара приводит к соответствующему росту теплопритоков.

На рисунке 21, в качестве примера, приведено типичное температурное поле в рассматриваемой области решения. Распределения температур в рассматриваемой области решения свидетельствуют о том, что изотермические линии сгущаются вблизи резервуара и зоны действия локального пожара и более разрежены при удалении от них.

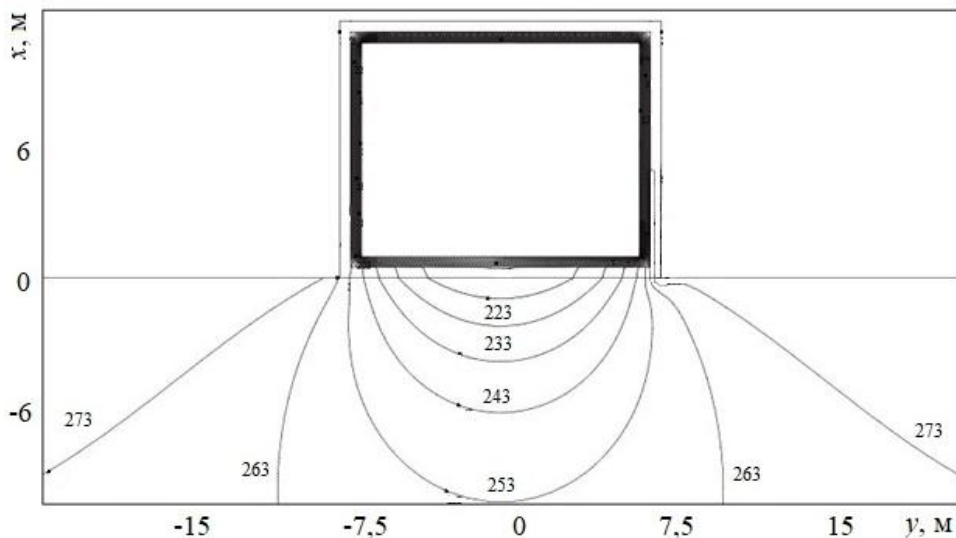


Рисунок 21 – Типичное температурное поле в зоне размещения надземного резервуара для хранения сжиженного газа, К ($Q=4500$ Вт/м²)

Анализ результатов численного моделирования позволяет обоснованно говорить о том, что за нормативное время до прибытия пожарного расчета к месту пожара в зоне размещения резервуара СПГ не произойдет критического нагрева его теплозащитной конструкции.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

В приложении к диссертационной работе содержатся справки и акты, подтверждающие внедрение результатов работы, а также свидетельства о государственной регистрации разработанных программ для ЭВМ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Разработан новый подход к анализу тепломассопереноса в тепловой защите системы транспортировки и хранения энергоносителей (тепло- и холодопроводы, хранилища топлив и СПГ) заключающийся в использовании моделей математической физики и учете основных факторов и процессов, влияющих на интенсификацию процессов переноса в рассматриваемых системах.

2. Проведен анализ влияния основных значимых факторов и процессов на интенсификацию тепломассопереноса в тепловой защите систем транспортировки и хранения энергоносителей.

3. Разработана методика численного анализа тепловых потерь теплопроводов, эксплуатируемых в условиях увлажнения тепловой изоляции. Показано, что тепловые потери теплопроводов в условиях увлажнения изоляции возрастают на 70-80 %, а вклад эффекта испарения влаги в тепловые потери составляет от 10.1 до 63.1 %.

4. Усовершенствована методика оценки тепловых потерь бесканальных теплопроводов, учитывающая полный спектр возможных условий эксплуатации и факторов, приводящих к росту тепловых потерь. Выявлено, что для бесканальных теплопроводов отклонение расчетных тепловых потерь от данных СНиП 41-03-2003 составляет около 40 %, что свидетельствует о существенно завышенных значениях тепловых потоков, получаемых при использовании нормативной методики.

5. Разработана методика численного анализа тепловых потерь канальных теплопроводов с использованием сопряженной нелинейной конвективно-кондуктивно-радиационной модели теплопереноса. Установлено, что применение предлагаемой модели теплопереноса при анализе тепловых потерь канальных теплопроводов позволяет уточнить величины тепловых потерь до 20 % по сравнению со СНиП 41-03-2003. Выявлено, что эксплуатация теплопроводов канальной прокладки без тепловой изоляции приводит к росту тепловых потерь на 73.35 %, а с деформированным теплоизоляционным слоем на 7,5–9,0 %.

6. Разработана методика численного анализа потерь холода резервуаров для хранения СПГ. Показано, что теплопритоки к резервуарам для хранения СПГ в условиях промерзания увлажненной тепловой изоляции, наличии миграции влаги к фронту фазового перехода и ее конденсации на внешнем контуре взаимодействия с окружающей средой возрастают от 36,7 % до 41,5 %.

7. Усовершенствована методика численного анализа тепловых потерь резервуаров для хранения топлив и СПГ с учетом взаимодействия с окружающей средой. Выявлено, что для хранилищ мазута и СПГ учет их взаимодействия с окружающей средой приводит к уточнению потерь от 5 % при надземном размещении до 15 % при подземной дислокации резервуаров, что говорит о завышенных значениях тепловых потоков при использовании отраслевых методик теплового расчета резервуаров не учитывающих теплоотвод в грунт.

8. Проведены экспериментальные исследования тепловых потерь теплопроводов в условиях увлажнения изоляции и коэффициентов водопроницаемости ряда теплоизоляционных материалов. Экспериментальные исследования подтвердили адекватность предлагаемых в диссертации подходов к анализу тепловых потерь теплопроводов, эксплуатируемых в условиях увлажнения изоляции. Установлено, что значения коэффициентов водопроницаемости современных волокнисто-пористых теплоизоляционных материалов лежат в диапазоне от $2 \cdot 10^{-9}$ до $4 \cdot 10^{-10}$ м².

9. Проведено экспериментальное и теоретическое исследование сушки тепловой изоляции теплопроводов, эксплуатировавшихся в условиях затопления. Показано, что типичная длительность сушки изоляции составляет от 20 до 46,3 часа.

10. Разработаны методики оценки усталостных напряжений, возникающих в структуре тепловой и низкотемпературной изоляции. При работе типичных теплопроводов в условиях затопления разрушение тепловой изоляции произойдет при значении суммарного времени действия напряжения равном около 24 суток. Для периодически работающей атмосферной низкотемпературной ППУ изоляции в течении всего срока службы опасности разрушения нет.

11. Рекомендации по совершенствованию методик анализа тепловых режимов тепловой защиты систем транспортировки и хранения энергоносителей:

11.1. При анализе тепловых потерь тепло- и холодопроводов, эксплуатируемых в условиях увлажнения изоляции, помимо учета увеличения теплопроводности теплоизоляционного покрытия, необходимо учитывать фазовые переходы. Нестационарностью процессов переноса в волокнисто-пористой тепловой изоляции можно обоснованно пренебречь, а для изоляции из вспененных полимеров она должна учитываться.

11.2. При проектировании бесканальных теплопроводов следует учитывать наличие дополнительных термических сопротивлений в зоне прокладки (например, отапливаемые подвалы зданий или снежный покров), а также сезонное изменение теплофизических свойств грунтов.

11.3. Для канальных теплопроводов тепловых сетей обязательным является учет конвективного движения среды в полости канала.

11.4. Анализ тепловых режимов тепловой защиты резервуаров для хранения топлива и СПГ необходимо проводить с учетом теплоотвода в грунт.

СПИСОК НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кузнецов Г.В., **Половников В.Ю.** Оценка масштабов тепловых потерь в магистральных теплотрубопроводах в условиях затопления // Промышленная энергетика. – 2006. – № 8. – С. 32–34.

2. Kuznetsov G.V., **Polovnikov V.Yu.** Numerical analysis of heat losses by main heat pipelines under conditions of complete or partial flooding // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2008. – V. 81. – № 2. – P. 323–331. = Кузнецов Г.В., **Половников В.Ю.** Численный анализ потерь тепла магистральными теплотрубопроводами в условиях полного или частичного затопления // Инженерно-физический журнал. – 2008. – Т. 81. – № 2. – С. 303–311.

3. Kuznetsov G.V., **Polovnikov V.Yu.** Numerical simulation of the thermal state of a flooded pipeline taking into account unsteadiness of the process of heat insulation saturation with moisture // Thermal Engineering. – 2008. – V. 55. – № 5. – P. 426–430. = Кузнецов Г.В., **Половников В.Ю.** Численное моделирование теплового состояния трубопровода в условиях затопления с учетом нестационарности процесса насыщения теплоизоляции влагой // Теплоэнергетика. – 2008. – № 5. – С. 60–64.

4. Кузнецов Г.В., **Половников В.Ю.** Оценка возможности разрушения тепловой изоляции трубопроводов, работающих в условиях периодического затопления // Промышленная энергетика. – 2009. – № 7. – С. 19–20.

5. Kuznetsov G.V., **Polovnikov V.Yu.** The conjugate problem of convective-conductive heat transfer for heat pipelines // Journal of Engineering Thermophysics. – 2011. – V. 20. – № 2. – P. 217–224.

6. Кузнецов Г.В., Озерова И.П., **Половников В.Ю.**, Цыганкова Ю.С. Оценка потенциала энергосбережения в системе транспортирования тепловой энергии // Энергетик.– 2012.– № 4.– С. 39–41.
7. Кузнецов Г.В., **Половников В.Ю.** Численное моделирование теплопереноса в зонах прокладки теплотрасс // Известия РАН. Энергетика. – 2012. – № 2. – С. 151–159.
8. Kuznetsov G.V., **Polovnikov V.Yu.** Numerical investigation of thermal regimes in twin tube channel heat pipelines using conductive convective model of heat transfer // Thermal Engineering. – 2012. – V. 59. – № 4. – P. 310–315. = Кузнецов Г.В., **Половников В.Ю.** Численное исследование тепловых режимов двухтрубных канальных теплопроводов с использованием кондуктивно-конвективной модели теплопереноса// Теплоэнергетика. – 2012. – № 4. – С.48–52.
9. **Половников В.Ю.**, Хабибулин А.М. Численное моделирование теплопереноса в тепловой защите резервуаров для хранения сжиженных углеводородных газов в условиях реальной эксплуатации // Тепловые процессы в технике. – 2013. – Т. 5. – № 6. – С. 270–275.
10. **Половников В.Ю.**, Губанов Ю.Ю. Тепловые потери в бесканальных тепловых сетях в условиях эксплуатации // Электрические станции. – 2014. – № 8. – С. 19–23.
11. **Polovnikov V.Y.**, Gubina E.V. Heat and Mass Transfer in a Wetted Thermal Insulation of hot Water Pipes Operating Under Flooding Conditions // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2014. – V. 87. – № 5. – P. 1151–1158. = **Половников В.Ю.**, Губина Е.В. Теплоперенос в увлажненной тепловой изоляции теплопроводов, работающих в условиях затопления // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 87. – № 5. – С. 1106–1112.
12. **Половников В.Ю.** Новый подход к анализу тепловых потерь в тепловых сетях в условиях затопления // Промышленная энергетика. – 2016. – № 1. – С. 20–23.
13. **Половников В.Ю.** Анализ тепловых потерь запорной арматуры тепловых сетей // Промышленная энергетика. – 2017. – № 4. – С. 40–42.
14. **Половников В.Ю.** Тепловые потери тепловых сетей в аварийных режимах эксплуатации // Энергетик. – 2018. – № 3. – С. 32–34.
15. Кузнецов Г.В., **Половников В.Ю.** Процессы тепло- и массопереноса в конструкциях и зонах размещения подземных тепловых сетей. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2019. – 280 с.

Подписано к печати 09.11.2020. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 2,33. Уч.-изд. л. 2,10.
Заказ 146-20. Тираж 100 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ