



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр И.Н.Бутакова

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИОННОГО  
ТЕПЛОПЕРЕНОСА В МИКРОСФЕРАХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ  
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ  
ТЕПЛОПРОВОДОВ**

УДК 697.34:662.998

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ83	Суслов Михаил Сергеевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ	Половников В.Ю.	к.т.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально- гуманитарных наук ШБИП	Маланина В.А.	К.Э.Н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст.преподаватель отделения общетехнических дисциплин ШБИП	Романова С.В.			

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Борисов Б.В.	к.т.н., профессор		

Томск – 2020 г.

**Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»**

Код	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P1	Применять <i>глубокие</i> естественно-научные, математические и инженерные <i>знания</i> для формулирования заданий на разработку проектных решений, проектировать инновационные теплоэнергетические и теплотехнические системы и оборудование, разрабатывать проектные решения, связанные с модернизацией технологического оборудования	Требования ФГОС (ОК-1, 2, ОПК-1, 2, ПК-1, 3), Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P2	Применять <i>глубокие знания</i> в области современных технологий промышленной теплотехники для решения междисциплинарных инженерных задач разработки и проведения мероприятий по совершенствованию технологии производства, обеспечению экономичности, надежности и безопасности эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования	Требования ФГОС (ОК-1, 2, ОПК-1, 2, ПК-1, 3, 8), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P3	Ставить и решать <i>инновационные задачи инженерного анализа</i> , в области технологий промышленной теплотехники, с использованием современных методов и средств математического моделирования и практической инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-1, 2, ОПК-2, ПК-1, 2, 3), Критерий 5 АИОР (пп. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P4	Разрабатывать инновационные технологические процессы, <i>проектировать</i> и использовать <i>новое</i> оборудование выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки, применять инновационные методы исследования, проводить исследования, критически интерпретировать, публично представлять и обсуждать результаты научных исследований	Требования ФГОС (ОК-1, 2, ОПК-1, 2, ПК-1, 3, 7), Критерий 5 АИОР (пп. 2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P5	Проводить теоретические и экспериментальные <i>исследования</i> в области современных технологий промышленной теплотехники в <i>сложных, неопределенных</i> условиях и представлять полученные результаты	Требования ФГОС (ОК-1, 2, ОПК-1, 2, ПК-1, 2, 3, 7), Критерий 5 АИОР (пп. 2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

P6	Применять знания нетехнических ограничений инженерной деятельности при внедрении, эксплуатации и обслуживании современных высокотехнологичных аппаратов и систем, обеспечивая их <i>высокую эффективность</i> , соблюдение правил охраны здоровья и безопасности труда на производстве, выполнять требования по защите окружающей среды	Требования ФГОС ОК-1, 2, ОПК-1, ПК-3, 4, 5, 6, 9, 10), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P7	Осуществлять педагогическую деятельность в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС ОК-1, ПК-11), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2, 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
<i>Универсальные компетенции</i>		
P8	<i>Активно</i> владеть <i>иностраным</i> языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной профессиональной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной научно-исследовательской и инженерной деятельности	Требования ФГОС ОПК-2, 3, ПК-7), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Эффективно работать индивидуально, в качестве <i>члена и руководителя группы</i> , состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, действовать в нестандартных ситуациях, принимать организационно-управленческие решения и нести за них ответственность при организации работ, разрабатывать мероприятия по предотвращению экологических нарушений	Требования ФГОС ОК-1, 2, ОПК-1, ПК-3, 4, 5, 7, 8, 9, 10), Критерий 5 АИОР (пп. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P10	Демонстрировать <i>глубокие знания философских аспектов</i> инновационной инженерной деятельности, компетентность в вопросах <i>устойчивого развития</i> , мыслить абстрактно, обобщать, анализировать, систематизировать и прогнозировать, принимать решения в сложных инженерных задачах с технической неопределенностью и недостатком информации	Требования ФГОС ОК-1, 2, ОПК-1, ПК-3, 4, 5, 7, 8, 9, 10), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	<i>Самостоятельно учиться</i> и, используя творческий потенциал, саморазвиваться, самореализовываться непрерывно <i>повышать квалификацию</i> в течение всего периода профессиональной деятельности	Требования ФГОС ОК-1, 3, ОПК-1, ПК-4, 8), Критерий 5 АИОР (1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа ИШЭ

Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Отделение школы (НОЦ) НОЦ И.Н.Бутакова

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 Борисов Б.В.

\_\_\_\_\_

(Подпись)

\_\_\_\_\_

(Дата)

### ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ83	Суслову Михаилу Сергеевичу

Тема работы:

Численное моделирование влияния радиационного теплопереноса в микросферах тонкопленочных теплоизоляционных покрытий на тепловые потери теплопроводов	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 43-61/с от 12.02.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2020
------------------------------------------	------------

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b>  <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Объект исследования – тонкопленочное теплоизоляционное покрытие. Предмет исследования – моделирование теплопереноса в тонкопленочной теплоизоляции.
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Обзор и анализ литературы и научных публикаций по направлению исследования;</li> <li>2. Формулирование физической и математической модели;</li> <li>3. Численная реализация математической модели</li> <li>4. Верификация и тестирование программы</li> <li>5. Проведение численного моделирования</li> <li>6. Заключение</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Слайды презентации</p>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p><b>Финансовый менеджмент</b></p>	<p>Маланина В.А., доцент Отделения социально-гуманитарных наук</p>
<p><b>Социальная ответственность</b></p>	<p>Романова С.В., старший преподаватель Отделения общетехнических дисциплин</p>
<p><b>Приложение I</b></p>	<p>Костомаров П.И. доцент Отделения иностранных языков</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p>Введение, Классификация и характеристики теплоизоляционных материалов теплопроводов и оборудования (Introduction, Classification and characteristics of thermal insulation materials for heating networks and equipment)</p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p>23.12.2019</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ</p>	<p>Половников В.Ю.</p>	<p>к.т.н., доцент</p>		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>5БМ83</p>	<p>Сулов М.С.</p>		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ83	Суслову Михаилу Сергеевичу

Инженерная школа	ИШЭ	Отделение	НОЦ И.Н. Бутакова
Уровень образования	магистратура	Направление	13.04.01. «Теплоэнергетика и теплотехника»

### Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	НИ выполняется на базе ТПУ с использованием оборудования университета, количество исполнителей НИ – 2 человека (Руководитель и инженер)
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	ГОСТ 14.322-83 Нормирование расхода материала. Основные положения; ГОСТ 51541-99 Энергосбережение. Энергетическая эффективность. Состав показателей. Общие положения.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления по страховым взносам составляют 30,2% от ФОТ

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Планирование процесса управления НИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	Планирование НИ, смета затрат на НИ
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Смета затрат на проект
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Определение практической значимости проекта

### Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Линейный план-график работ
-------------------------------

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	23.03.2019
------------------------------------------------------	------------

### Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Маланина В.А.	к.э.н., доцент		

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ83	Суслов Михаил Сергеевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5БМ83	Суслову Михаилу Сергеевичу

<b>Инженерная школа</b>	ИШЭ	<b>Научно образовательный центр</b>	им.И.Н. Бутакова
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление</b>	13.04.01. «Теплоэнергетика и теплотехника»

Тема ВКР:

Исследование влияния радиационного теплопереноса в микросферах тонкопленочных теплоизоляционных покрытий на тепловые потери теплопроводов

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования.	Объектом численного исследования является нанесенный на теплопровод слой сверхтонкой теплоизоляции Область применения – теоретическая теплоэнергетика, альтернативная энергетика. Рабочая зона-компьютерный класс (4 корпус ТПУ 48 аудитория)
-----------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Режим рабочего времени регламентируется в соответствии с ТК РФ ст. 100;</li> <li>– Оплата и нормирование труда регулируются в соответствии с ТК РФ Раздел VI;</li> <li>– Глава 14 ТК РФ отражает защиту персональных данных работника.</li> <li>– Права работника отражены в ТК РФ, ФЗ № 197. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны:</li> <li>– Рабочее место должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78;</li> <li>– В соответствии с СН-245-71 в помещении должен быть организован воздухообмен.</li> <li>– СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.</li> <li>– ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ «Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования»</li> </ul>
<b>2. Производственная безопасность</b> 2.1. Анализ потенциально возможных вредных и опасных факторов проектируемой производственной среды. 2.2. Разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов	<ul style="list-style-type: none"> <li>– воздействие электрического тока;</li> <li>– отклонение показателей микроклимата в помещении;</li> <li>– недостаточная освещенность рабочей зоны;</li> <li>– повышенный уровень электромагнитного излучения;</li> <li>– Повышенный уровень ультрафиолетовой и инфракрасной радиации;</li> <li>– повышенный уровень шума на рабочем месте.</li> </ul>
<b>3. Экологическая безопасность</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы, утилизация компьютерной техники и периферийных устройств);</li> <li>– решение по обеспечению экологической безопасности.</li> </ul>

<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Возможные ЧС на объекте: техногенного характера - пожар;

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	20.03.2020
-------------------------------------------------------------	------------

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель отделения общетехнических дисциплин	Романова Светлана Владимировна			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ83	Суслов Михаил Сергеевич		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 93 с., 6 рис., 16 табл., 66 источников.

Ключевые слова: численное моделирование, энергосбережение, изоляционный материал, теплоснабжение, хранение и транспортировка энергии, тонкопленочная теплоизоляция.

Объектом исследования является нанесенный на трубопровод слой сверхтонкой теплоизоляции толщиной 0,33 мм, предполагалось что слой состоит из связующего вещества заполненного микросферами с соотношением 38:62. Моделирование проводилось для микросфер с двумя значениями толщины стенки.

Цель работы – моделирование влияния радиационного теплопереноса в микросферах тонкопленочных теплоизоляционных покрытий на тепловые потери теплопроводов.

В ходе исследования с помощью функций и средств, имеющихся в пакете программ мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics, было проведено моделирование тепловых режимов слоя изоляции.

В процессе исследования были определены значения тепловых потерь с учетом различных геометрических характеристик микросфер, входящих в исследуемый материал.

Основные технологические, конструктивные и технико эксплуатационные характеристики: тонкопленочная тепловая изоляция используется для снижения потерь тепла промышленного энергетического оборудования и теплопроводов.

Область применения: теплообменное оборудование, система теплоснабжения.

Оглавление	
Введение.....	12
1 КЛАССИФИКАЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЕПЛОПРОВОДОВ И ОБОРУДОВАНИЯ.....	14
1.1 Характеристики и требования к теплоизоляции.....	14
1.1.1 Пористость.....	14
1.1.2 Плотность.....	15
1.1.3 Водопоглощение .....	16
1.1.4 Паропроницаемость .....	16
1.2 Классификация тепловой изоляции. ....	17
1.3 Тонкопленочные теплоизоляционные покрытия.....	28
2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ «ПОЛЫЕ МИКРОСФЕРЫ – СВЯЗУЮЩЕЕ ВЕЩЕСТВО».....	31
2.1 Постановка общей физической задачи .....	31
2.2 Математическая модель .....	32
2.3 Метод решения и описание платформы для моделирования.....	34
3 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В МИКРОСФЕРАХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ ТЕПЛОПРОВОДОВ.....	36
3.1 Исходные данные .....	36
3.2 Результаты численного моделирования .....	37
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕССУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	43
4.1 Планирование работ и оценка времени их выполнения .....	44
4.2 Смета затрат на проект .....	45
4.2.1 Материальные затраты. ....	45
4.2.3 Затраты на заработную плату. ....	46
4.2.5 Затраты на социальные нужды (отчисления).....	47
4.2.6 Прочие затраты.....	47
4.2.7 Накладные расходы. ....	48
4.3 Определение ресурсной эффективности исследования.....	48
4.4 Комплексный анализ научно-исследовательского проекта для исследования внутренней и внешней среды проекта.....	50

4.5 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	52
4.6 Диаграмма Ганта .....	54
Вывод по разделу .....	55
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	56
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	58
5.1.1 Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства .....	58
5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны .....	58
5.2 Производственная безопасность .....	59
5.2.1 Анализ потенциально вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	59
5.2.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя. ....	65
5.3 Экологическая безопасность.....	69
5.3.1 Анализ влияния рабочей зоны для моделирования на окружающую среду .....	69
5.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду .....	70
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	71
Выводы по разделу.....	73
Список использованных источников .....	74
Приложение I .....	79

## **Введение**

Рациональное потребление энергетических ресурсов, вопросы энергоэффективности и безопасности в энергетике выступают приоритетным направлением развития нашего государства. Учет количества потребления энергоносителей, условия их транспортировки, являются важными вопросами энергосбережения на данный момент.

Актуальность этих вопросов обусловлена значительной длительностью отопительного периода (для Томской области составляет более 230 дней, а в некоторых северных регионах отопление осуществляется круглогодично), довольно низкой среднегодовой температурой окружающей среды ниже  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Тепловые потери при транспортировке тепловой энергии превышают 70 млн. т. у. т. в год при общем потреблении теплоресурсов 400 млн. т. у. т. в год. Ежегодные энергопотери в нашей стране соизмеримы с годовым энергопотреблением индустриально развитых государств Евросоюза [1]. Такая масштабная проблема объясняется большой протяженностью трубопроводов тепловых сетей, из которых примерно 23 % находится в аварийном состоянии.

Для повышения показателей энергоэффективности теплоснабжающих систем следует сократить сверхнормативные тепловые потери, которые обусловлены утечкой теплоносителей и потерями тепла с поверхности теплопроводов, в том числе из-за неудовлетворительного технического состояния теплоизоляционных конструкций трубопроводов и оборудования. У традиционных видов теплоизоляции имеет место снижение теплозащитных свойств в ходе эксплуатации, связано это со структурными особенностями, влияние которых в основном происходит из-за открытой пористости.

Известно, что эффективным способом снижения потерь тепловой энергии при ее хранении и транспортировке, является использование высокоэффективных теплоизоляционных материалов [2-5], отвечающих современным требованиям. Такого типа материалами являются тонкопленочные теплоизоляционные материалы, которые изготавливаются из пустотелых микроскопических сфер и различного состава связующих

компонентов. Данное покрытие легко наносится на любые, даже сложной геометрической формы поверхности при помощи пульверизатора или валика. Однако, на сегодняшний день далеко не в полной мере изучены теплофизические свойства данных материалов [3]. У одного и того же материала может существенно отличаться коэффициент теплопроводности. [6,7].

Довольно большое количество работ посвящено исследованиям тонкопленочной тепловой изоляции и эффективности ее применения, а также теплопереноса в ее слое [6-21]. В этих работах освещаются вопросы технологии использования светопропускающих тонкопленочных теплозащитных покрытий [8-12], кондуктивного теплопереноса в слое тонкопленочной тепловой изоляции [7, 13, 14], также разного рода практические приложения [15-21], в которых исследуется влияние условий эксплуатации тонкопленочной тепловой изоляции на уровень тепловых потерь оборудования и трубопроводов.

Исследования [7] показали, что теплоперенос в газонаполненных полостях микросфер может осуществляться за счет теплопроводности, конвекции и лучистого теплообмена. В современной научной литературе [2-21] отсутствует описание влияния механизмов теплопереноса в тонкопленочных теплоизоляционных покрытиях на интенсификацию тепловых потерь энергетического оборудования. По этой причине для оценки влияния лучистого теплообмена необходимым является исследование сопряженного кондуктивно-конвективно-радиационного теплопереноса в рассматриваемой системе.

Актуальность работы. В настоящее время состояние тепловых сетей в России оценивается как неудовлетворительное. В связи с этим, появляется необходимость разработки современных технологий в сфере тепловой защиты и модернизацию существующих видов теплоизоляции. Тонкопленочные теплоизолирующие покрытия имеют уникальными теплофизическими свойствами, это находит им широкий круг применения в сфере энергоснабжения. Но данная технология не получила широкого распространения, в связи с недостатком знаний о физических свойствах данных материалов и о протекающих в них процессах тепломассопереноса. К тому же,

на данный момент нет достаточного количества объективных исследований, которые бы давали точную и подтвержденную информацию об оптимальном составе компонентов и структуре этих материалов, при которых обеспечивалась максимальная эффективность при их эксплуатации.

Объект исследования – тонкопленочный теплоизоляционный материал, фактический состав которого является коммерческой тайной и не раскрывается производителями.

Предметом исследования является анализ влияния радиационного теплопереноса в микросферах тонкопленочных теплоизоляционных покрытий.

Практическая значимость результатов. Проведенные исследования показали, что применение данного материала возможно в сфере энергетики для снижения тепловых потерь с поверхностей трубопроводов тепловых сетей и различного рода энергооборудования.

Целью работы является исследование влияния радиационного теплопереноса в микросферах тонкопленочных теплоизоляционных покрытий на тепловые потери теплопроводов с применением численного моделирования.

## **1 КЛАССИФИКАЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЕПЛОПРОВОДОВ И ОБОРУДОВАНИЯ.**

### **1.1 Характеристики и требования к теплоизоляции**

#### **1.1.1 Пористость**

Главным и общим требованием к теплоизоляции, что определяет их основные технические свойства, есть высокая пористость.

Пористость теплоизоляции – это отношение общего объема всех пор, что есть в материале, к общему объему материала. Плотность теплоизоляционных материалов преимущественно зависит от химической природы материала и пористости. В этом случае под термином «плотность» понимают среднюю плотность, при расчете которой учитывают действительную плотность твердого вещества, с которого построен каркас

материала, и плотность воздуха, что заполняет поры в каркасе. Значение пористости и плотности материала взаимосвязаны обратным соотношением, то есть чем больше пористость, тем меньше плотность самого материала [22].

### 1.1.2 Плотность

Плотность теплоизоляционных плит, что предназначены для устройства теплоизоляции зданий и сооружений, должна быть: - минераловатных плит – не менее  $160 \text{ кг/м}^3$ ; - плит из вспененного бисерного полистирола – не менее  $25 \text{ кг/м}^3$ ; - плит из вспененного расплава полистирола –  $30\text{-}38 \text{ кг/м}^3$ . Самым важным показателем качества теплоизоляции есть коэффициент теплопроводности. Теплоизоляционные материалы в результате их высокой пористости должны иметь низкие коэффициенты теплопроводности и высокие теплоизоляционные показатели [23]. Поскольку высокопористые материалы есть двухфазными элементными системами, которые состоят с твердого вещества, что создает стенки пор (каркас), и воздуха, что заполнил поры, их теплопроводность зависит от теплопроводности твердых веществ, что создают каркас, и теплопроводности воздуха. Численные значения коэффициентов теплопроводности теплоизоляции зависят от химической природы твердой фазы (каркаса): пористости, размера пор, характера пор (замкнутые или открытые), средней плотности материала, а также от условий их хранения, использования и эксплуатации. Для теплоизоляционных плит, что используются при устройстве внешней теплоизоляции дома, коэффициенты теплопроводности при температуре  $298 \pm 5 \text{ К}$  должны быть не больше: - минераловатных плит –  $0,05 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ; - пенополистирольных плит –  $0,042 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Пористая структура теплоизоляционных материалов обуславливает капиллярное и гигроскопическое увлажнение, что ухудшает основные свойства материалов: теплопроводность, плотность, прочность. Увлажнение материалов зависит от наличия большого количества открытых пор, что связаны с внешней природной средой и через которые влага попадает с этой среды в материал. Содержание влаги в теплоизоляции (влажность) выражают у процентах от массы (для минераловатных плит) и за объемом (для пенополистирольных

плит). Влажность плит, что поступают на объект для его утепления, не должна превышать 1%. Поскольку влажность плит, что получают из вспененного бисерного полистирола, сразу после их изготовления равна 12%, они должны быть выдержаны при температуре  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  в закрытом вентилируемом помещении не менее двух месяцев с момента их изготовления [23].

### **1.1.3 Водопоглощение**

Водопоглощение теплоизоляции – это свойство материала поглощать определенное количество воды и удерживать ее в своих порах. Водопоглощение характеризуется количеством воды, что поглощается образцом теплоизоляции при выдержке его в воде 10 на протяжении определенного времени, отнесенной к массе сухого образца, и выраженного в процентах. Теплоизоляция с преимущественно закрытыми порами имеет водопоглощение ниже, чем материал с открытыми порами. Водопоглощение теплоизоляции, что используется при устройстве утепления дома, не должно превышать за 24 часа:

- минераловатных плит 30% (от массы);
- пенополистирольных плит 2,0% (от объема).

Теплоизоляционные материалы должны иметь определенную паропроницаемость, то есть «дышать». Использование паропроницаемых материалов при устройстве внешней теплоизоляции зданий способствует созданию оптимального влажно-воздушного режима в помещениях дома, а также повышению долговечности внешних ограждающих конструкций за счет повышения их стойкости до внешних влияний отрицательных и положительных температур [24].

### **1.1.4 Паропроницаемость**

Паропроницаемость теплоизоляции – это свойство материала пропускать сквозь всю его толщину водяную пару при наличии перепадов давления и температуры. Паропроницаемость теплоизоляционных материалов должна быть не меньше:

- пенополистирольных плит –  $0,03 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{Па})$ ;
- минераловатных плит –  $0,3 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{Па})$ .

## 1.2 Классификация тепловой изоляции.

Величина тепловых потерь с поверхности теплопроводов может зависеть от различных факторов[25], таких как протяженность, диаметр, материал тепловой изоляции, температурный график, техническое состояние теплопроводов, срок их эксплуатации.

Способ тепловой изоляции теплопроводов выбирается в зависимости от геометрических параметров трубопровода, рабочей температуры теплоносителя, вида прокладки тепловой сети[26].

Для теплоизоляционных материалов для трубопроводов и аппаратов, самым важным параметром является коэффициент теплопроводности, и чем ниже его значение, тем меньшие потери тепла будут при производстве и транспортировке тепловых ресурсов. Не маловажными является такой параметр, как диапазон рабочих температур и условия эксплуатации тепловой сети.

Характеристики утеплителей отличаются очень низкой теплопроводностью ( $\kappa < 0,18 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$ ) и небольшой плотностью, которая не превышает  $600 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Их используют для теплоизоляции всех наружных строительных конструкций, в качестве звукоизоляции помещений - для внутренних стен и перегородок, а также при выполнении работ по теплоизоляции различных тепловых агрегатов, теплопроводов и холодильного оборудования.

Материалы для тепловой изоляции очень разнообразны, поэтому классифицируются они по многим параметрам.

Классификация теплоизоляционных материалов и их характеристики, в зависимости от структуры:

- Волокнистые. К ним относятся минераловатные и стекловолоконные утеплители органического и неорганического происхождения,

состоящие из волокон. Перенос тепла в таких материалах осуществляется от волокна к волокну при касаниях, чем меньше сечение волокна, тем выше теплоизолирующие свойства. Минимальная толщина волокон неорганического происхождения - 5-8мк, при превышении этого значения нарушается прочность волокон;

- Зернистые. К ним относятся вспученные вермикулит, шлак, асбозурит и перлит;
- Ячеистые. В эту группу входят различные виды пенопласта, пеностекло, конструкции из ячеистого бетона, вулканитовые плиты.

В зависимости от формы и внешнего вида, утеплители делятся на:

- Штучные. К этому виду относятся выполненные из теплоизоляционных материалов блоки, кирпич, плиты, теплоизоляционные цилиндры и полуцилиндры, скорлупы ппу для изоляции труб, сегменты и другие изделия;
- Рулонные и шнуровые. К ним относятся различные маты прошивные, жгуты и шнуры.
- Рыхлые и сыпучие - это минеральная, базальтовая и стекловата, перлитовый песок и др.

По степени горючести современные теплоизоляционные материалы подразделяются на:

- Несгораемые (минеральная вата, керамзит, ячеистый бетон и др.)
- Трудногораемые (ксилолит, цементно - стружечные)
- Сгораемые ячеистые (торфоплита, камышит, различные пластмассы)

В зависимости от сырья утеплители подразделяются на:

- Неорганические (различные виды минеральной ваты и изделия на её основе, стекловолокно и производимые из него изделия, асбест, а также содержащие его материалы, вспученные вермикулит и перлит, ячеистые материалы, диатомит-трепел, алюминиевая фольга)

- Органические (торфяные изделия, древесно-волоконистые плиты, эковата, поропласты, пенопласты). Технология теплоизоляционных материалов, в которой утеплитель производится из смеси сырья органического и неорганического происхождения, при превышении неорганического сырья более чем на 50% от массы, позволяет получать неорганический материал.

По содержанию связующего вещества материалы и изделия подразделяют на:

- Современные теплоизоляционные материалы, которые содержат связующее вещество (ячеистый бетон, фибролит и т.д.);
- Утеплитель, не содержащий связующего вещества (стекло - и минераловатное волокна).

По плотности утеплители делятся на:

- Обладающие особо низкой плотностью (ОНП) - 15,25,35,50,75;
- Обладающие низкой плотностью (НП) - 100,125,150,175;
- Обладающие средней плотностью (СП) - 200,225,250,300,350;
- Плотные (ПЛ) - 400,450,500,600.

Если для утеплителей, обладающих жесткостью, плотность соответствует отношению массы находящегося в сухом состоянии материала к его объему, то для волокнистых утеплителей такое соотношение определяется при воздействии на него заданной нагрузке.

По степени сжатия материалы классифицируются на:

- Мягкие (М)- свыше 30
- Полужесткие утеплители (ПЖ) - 6-30
- Жесткая теплоизоляция (Ж) - до 6;
- Материалы повышенной жесткости (ПЖ) - до 10 (при воздействии давления 40 Н/кВ.см)
- Твердые - до 10 (под давлением 100 Н/кВ. см).

Свойства материала изменять свою толщину под воздействием определенного давления называется сжатием.

Классификация современных теплоизоляционных материалов по теплопроводности:

- Низкая -  $0,06 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$ ;
- Средняя -  $0,06 - 0,115 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$ ;
- Повышенная -  $0,115-0,175 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$ .

Плотность утепляющих материалов служит показателем качества, поэтому эти данные обязательно вносятся в маркировку материала.

Разновидности утеплителей:

- Ваты минеральные и неминеральные (имеющие стеклянную, каменную, целлюлозную основу)
- Теплоизоляционные блоки (газобетон, пенопласты и другие плитные теплоизоляционные материалы для стен и перекрытий)
- Тонколистовая теплоизоляция;
- Теплоизоляционные материалы для труб;
- Уплотняющие ленты, шнуры и профили;
- Вспенивающийся герметик;
- Засыпной утеплитель;
- Асбестовые теплоизолирующие материалы.

Сырьем для производства теплоизоляционных материалов служат минеральные, композиционные и полимерные материалы. Комплексное использование теплоизоляции с различного рода паро- и гидроизолирующими пленочными и мембранными материалами, применение тонколистового металла и фольги в качестве экранирующего защитного слоя позволяет значительно увеличить срок службы утеплителя в любых самых агрессивных условиях эксплуатации.

В таблице 1.1 представлены распространенные теплоизоляционные материалы, используемые в настоящее время.

**Таблица 1.1 - Классификация современных, наиболее распространенных теплоизоляционных материалов для трубопроводов и аппаратов[30]**

Наименование	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Водопоглощение за 24 часа	Средний предел прочности и при сжатии, МПа	Максимальная температура применения, °С	Недостатки	Достоинства	Область применения
Плита	34-400	0,033-0,058	3% по объему	0,001-0,15	300-700	потеря теплоизоляционных свойств при намокании, содержит в составе вредные компоненты, минеральные волокна и связывающие смолы	высокая термоустойчивость, огнестойкость, паропроницаемость, биологическая и химическая стойкость, негигроскопичность	тепловая изоляция промышленного оборудования, трубопроводов, строительных конструкций
Полужесткая плита	34-135	0,035-0,042	5% по объему	0,005-0,013	300-700	то же	то же	то же
Каолино-вая вата	80	0,15-0,30	3% по объему		1100		высокая термостойкость, высокая химическая стойкость, небольшая плотность, стойкость к термоударам, эластичность	изоляция энергетического оборудования, трубопроводов, сводов или стен, различных видов печей
Каолиновые плиты на глиняном связующем	250-500	0,130-0,175	3% по объему	0,3-2,0	1200		то же	то же

Каолиновые плиты на глиняном связующем безобжиго- вые	250-350	0,110-0,151	3% по объему	0,3-0,8	1250		то же	то же
Жесткая плита	50-140	0,01-0,025		0,030- 0,033	400	небольшой срок эксплу- атации, высокая лом- кость волокна, необхо- димость соблюдения строгих мер предосто- рожности при работе с этим материалом, низкая температура эксплуатации	повышенная упру- гость, устойчивость к вибрации, высокая химическая стой- кость, негигроско- пичность, высокая паропроницаемость и водоотталкивающие свойства	теплоизоляция трубопроводов, звукоизоляция перегородок, утепление деревянных домов, металлоконструкций кровли, фасада
Плита	13-75	0,01-0,025		0,035- 0,061	400	то же	то же	то же
Мягкая плита	17-19	0,008-0,020		0,033- 0,041	400	то же	то же	то же
Мягкий мат	11-35	0,008-0,025		0,033- 0,061	400	то же	то же	то же
Стекловата	25	0,010-0,45		0,047	400	то же	то же	то же
Стекло- волокно	60-80	0,040-0,042			200	то же	то же	теплоизоляция трубопроводов, ограждающих конструкций, изоляторов в элек- тротехническом производстве, химической и нефтегазовой промышленностях

Пенобетон	200-400	0,05-0,14	14% от массы	0,7-2,5	150	низкая прочность на изгиб, неточность размеров	огнестойкость, низкая влагонасыщаемость	теплоизоляция промышленного оборудования и строительных конструкций
Ячеистый бетон	200-500	0,01-0,15	5% от массы	0,3-2,5	150		паропроницаемость, огнестойкость	то же
Пенобетон неавтоклавный	500	0,05	10% от массы		150	высокий уровень водопоглощения, низкая прочность на изгиб	огнестойкость, прочность, морозостойкость, биологическая стойкость	то же
Газобетон	300-500	0,093-0,127	5% от массы	0,4-1,2	200	высокий уровень водопоглощения, низкая прочность на изгиб	огнеупорность, точность соблюдения размеров	то же
Армопенобетон	350-450	0,08-0,16	14% от массы	1,0-2,5	150		защита металлических труб от внешней коррозии, высокая прочность на сжатие	тепловая изоляция трубопроводов
Пенополимербетон (пенополимерминерал)	400	0,07	5% по объему	0,8	150	высокие показатели по объемной массе	высокая теплостойкость, механическая прочность, ремонтпригодность, не требует дополнительной гидроизоляция, антикоррозионная защита, длительный срок службы, паропроницаемость	тепловая изоляция трубопроводов тепловых сетей и систем ГВС

Верми- кулит	100-200	0,05-0,18	10% по объему		1350		высокая температуроустойчивость, огнестойкость, биологическая стойкость	энергетика, металлургия, промышленность химическая, и лакокрасочная, автомобилестроение
Перлит	75-500	0,046-0,08	10% по объему		600		гидрофобный, негорючий, хорошая звукоизоляция	при ремонте изоляции теплопроводов, в строительстве
Пено-стекло	100-600	0,03-0,1	10% по объему	0,5-7,5	1000	отсутствует паропроводимость, очень хрупкий, тяжесть блоков, плохо переносит ударные нагрузки	отсутствие окисления, не подвержен эрозии, высокая прочность, неизменность размеров, шумоизоляция, влагостойкость, длительный срок службы	теплоизоляция оборудования в атомной промышленности в энергетике, при строительстве высотных сооружений, в сооружениях связанных с водной средой
Шамотный ультра-легковес ШЛБ-0,4	400	0,149		0,8-1,2	1700		огнеупорный	для частей рабочей зоны различных видов печей
Арболит	350	0,12		0,5	90	токсичен, недостаточная точность геометрии	повышенная прочность на изгиб, звукоизоляция, огнеупорный, удобен для обработки	теплоизоляция трубопроводов и ограждающих конструкций

Фибролит	300-350	0,10-0,11		0,4-1,2	90	при влажности выше 35% может поражаться домовым грибом	не горит открытым пламенем, легко обрабатывается, хорошая адгезия	для изоляции стен и покрытий, перегородок, каркасных стен и перекрытий только в сухих условиях
Торфяные плиты и блоки	150-430	0,052-0,080		0,3-1,7	90	в увлажненном состоянии могут проявлять склонность к микробиологическому самовозгоранию	водостойкость, биологическая стойкость, защита от радиации	для изоляции паропроводов, для утепления несущих и ограждающих конструкций
Пробковый рулон	150	0,04			120		шумоизоляция, водонепроницаемость, не теряет размеров при изменении параметров температуры и влажности	теплоизоляция трубопроводов, для утепления и звукоизоляции
Пробковая плита	95-130	0,035-0,049		0,20-0,14	120	при длительном воздействии деформируется	долговечность, износостойкость	теплоизоляция трубопроводов, отделочный материал для стен и потолков
Пенополистирол (ППС)	25-50	0,027-0,05	0,4-3% по объему	0,08-0,50	75	возможно частичное разрушение при температуре свыше 80 градусов, низкая паропроницаемость	при воздействии влаги термоизоляционные свойства сохраняются, малый вес	теплоизоляция трубопроводов
Пенополиуретан (ППУ)	50-100	0,033-0,050	0,8% по объему	0,10-0,22	110-150	УФ излучение приводит к быстрому износу материала	теплостойкость, морозостойкость, хорошая сцепляемость с различными материалами	теплоизоляция трубопроводов и ограждающих конструкций

Карбамидоформальдегидные, мочевиноформальдегидные пенно- и поро-пласты	8-25	0,03-0,05	20% от массы	0,003-0,025	120		долговечность, износостойкость, звукоизоляция	изоляция в холодильной технике и строительстве
Полиэтиленовые и полиэфирные поро-пласты	20-55	0,035-0,048	10% от массы	0,020-0,025	75		водо-, газо- и паро- непроницаемость, небольшая масса, эластичность, химическая стойкость, устойчивость к коррозии	теплоизоляция паропроводов, тепло- и пароизоляция кровли, стен и пола
Пенополипропилен НПП ЛФ	40	0,034	8% от массы	0,025	75		тепло-, паро- и звукоизоляция, не подвержен гниению и коррозии	теплоизоляция паропроводов, тепло- и пароизоляция кровли, стен и пола
Фенольно-резольные поропласты (ФРП)	65-110	0,041-0,043		0,4-3,0	130-150		теплостойкость, морозостойкость, огнестойкость	изоляция трубопроводов, промышленного оборудования, строительных ограждающих конструкций

Вспененные синтетические каучуки	40-70	0,038-0,04			105		высокая паро- и водонепроницаемость, эластичность в широком диапазоне температур, способность к самозатуханию при пожаре, высокая стойкость к микроорганизмам, плесени, атмосферным явлениям	изоляция систем теплоснабжения, нефтепроводов, резервуаров, холодильных установок, холодных трубопроводов и емкостей, систем кондиционирования воздуха, вентиляции и водоснабжения
----------------------------------	-------	------------	--	--	-----	--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### 1.3 Тонкопленочные теплоизоляционные покрытия

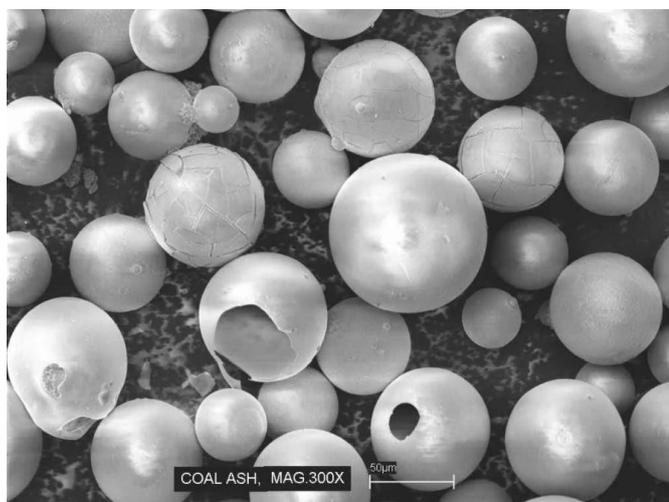
В связи с высоким темпом развития науки, с каждым годом на рынке теплоизоляционных материалов появляются современные и более совершенные виды изоляций, которые призваны обеспечить большую степень эффективности, сравнительно небольшую дороговизну и решить ряд инженерных задач, актуальных на сегодняшний день.

Из того, что было упомянуто выше, можно выделить один принципиально новый материал, который относительно недавно появился на отечественном рынке, и который уже зарекомендовал себя в сфере теплового снабжения и строительства. Это тонкопленочное изоляционное покрытие. Его также называют сверхтонкой или керамической теплоизоляцией. Оно представляет собой связующее вещество (как правило, в основном это акриловые полимеры, но также существуют композиции на водной основе), в состав которого в роли наполнителя входят разного вида микросферы при различных соотношениях концентрации. Такие материалы обладают физическими свойствами красок, но за счет внедрения в них микросфер, у них наблюдается пониженное значение коэффициента теплопроводности. Данные о коэффициентах теплопроводности у этих материалов везде разнятся и являются весьма противоречивыми. Так, например, в различных источниках, содержащих технические инструкции и указания по эксплуатации сверхтонкой жидкой теплоизоляции, коэффициент теплопроводности находится в интервале, что говорит о слишком большом и неопределенном разбросе значений [55]. Поэтому оценка величины коэффициента теплопроводности тонкопленочных изоляционных покрытий и расширение области их применений являются достаточно актуальными задачами на данный момент.

Как было сказано выше, данный материал может состоять из полых сфер, заполненных воздухом или газовой фазой, вакуумированных либо сплошных микросфер разного диаметра. Они могут иметь керамический,

силикатный или стеклянный состав, а также могут состоять из керамических элементов, пеностекла, перлита и разного рода наполнителей, которые в свою очередь и придают данному материалу пористую структуру и обеспечивают высокие теплоизоляционные свойства. Все вышеперечисленные элементы находятся в связующем вязком веществе (акриловом полимере), физические свойства которого похожи на краску.

По природе происхождения разделяют два типа микросфер. Микросферы первого типа производят путем сжигания угля, перемолотого до мелких частиц. Второй тип получают из заранее специально приготовленных расплавов стекла, которые в дальнейшем подвергают переохлаждению. Такие расплавы стекла называют фриттой. Если заводить речь о полых микросферах, то существуют тонкостенные и толстостенные микросферы. У тонкостенных микросфер толщина стенки обычно не превышает 10% от диаметра сферы, а достоинством является повышенный объем газовой или воздушной фазы внутри относительно толстостенных микросфер, за счет чего повышается эффективность изоляции. С другой стороны, недостатком по сравнению с толстостенными сферами является высокая хрупкость и низкая плотность тонкостенных микросфер [27]. На рисунке 1.1.3 изображена структура одного из видов энергосберегающей краски с полыми микросферами в акриловом полимере под микроскопом.



**Рисунок 1.2.1 - Структура энергосберегающей краски с полыми микросферами**

Диаметры микросфер могут лежать в пределах 0,015-0,5 мм. В зависимости от состава и вида, данная энергосберегающая краска может растворяться водой либо органическими растворителями, например, ацетоном и различными спиртами. Следовательно, может являться как безвредной и не токсичной, так и токсичной и представляющей какой-либо вред здоровью, а также окружающей среде в определенных обстоятельствах. Материал наносится с помощью кисти, валика или краскопульта тонким слоем. Нанесение последующих слоев производится только после полного высыхания предыдущих. Такая жидкая тонкопленочная изоляция имеет температуру эксплуатации в среднем от -60 до 120 и применима к достаточно широкому типу поверхностей, среди которых выделяют металл, дерево, кирпич, бетон и другие. Но следует заметить, как отмечено публикации [56], использование ТТИ как полноценная изоляция теплопроводов является экономический невыгодно. Для получения характеристик покрытия, соответствующих требованиям нормативной документации, требуется многократное нанесение покрытия с послойной просушкой для получения необходимой толщины слоя, что является нецелесообразным и нетехнологичным. Микросферы на данный момент в России изготавливаются в основном из боросиликатного стекла [57].

#### **4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕССУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

Данная работа посвящена численному моделированию влияния радиационного теплопереноса в микросферах тонкопленочных теплоизоляционных покрытий на тепловые потери теплопроводов. Финансовая часть данной работы посвящена расчету затрат на исследования и оценку хозяйственной деятельности.

Значительные тепловые потери в системах теплоснабжения, оборудования энергетики и неудовлетворительное состояние их теплоизолирующего слоя, обосновывают необходимость разработки новых технологий снижения уровня тепловых потерь в рассматриваемых системах. Уникальные теплофизические характеристики тонкопленочных теплоизоляционных покрытий позволяют использовать их в различных энергетических системах и оборудовании. Несмотря на это, технологии применения тонкопленочных теплоизоляционных покрытий к настоящему моменту времени не получили развития. Это обусловлено рядом причин, основными из которых являются: недостаток знаний о физических свойствах и механизмах процессов теплопереноса в тонкопленочных теплоизоляционных покрытиях. Математическое моделирование процессов теплообмена играет важную роль в исследованиях и проектировании новейших энергосберегающих теплоизоляционных материалов. Для современной техники и науки необходим точный прогноз таких процессов теплопереноса, натурные исследования которых очень дороги и сложны, а иногда и просто невозможны. Моделирование позволяет исключить сложные и дорогостоящие эксперименты для исследования процессов теплопереноса в слое тонкопленочной тепловой изоляции.

Цели проекта: изучение влияния радиационного теплопереноса в микросферах тонкопленочных теплоизоляционных покрытий на тепловые потери теплопроводов

Данная задача имеет практическое значение в энергетической отрасли так как для уменьшения тепловых потерь требуется разработка, проектирование новых, высокотехнологичных, энергоэффективных материалов, каким и является тонкопленочная тепловая изоляция.

#### 4.1 Планирование работ и оценка времени их выполнения

В данном подразделе идет составление календаря продолжительности работы инженера (магистранта) и НР (научного руководителя). В качестве научного руководителя был выбран доктор физико-математических наук, профессор научно-образовательного центра И.Н.Бутова ИШЭ ТПУ. Данные по основным пунктам, таким как: наименование работы, количество исполнителей и продолжительность дней предоставлены в таблице 4.1. Под наименованием работ были представлены необходимые действия, проводимые для получения конечной цели. Количество исполнителей – то число лиц, которое принимало участие в работе. Продолжительность дней – количество дней, затраченных для реализации проекта.

Таблица 4.1 – Перечень проводимых работ, и затраченные на них временные ресурсы.

№ раб.	Наименование работ	Количество исполнителей	Продолжительность, дней
1	Определение направления и тематики проводимой научной работы	НР, Инженер	1
2	Проведение анализа и поиска научной литературы по выборной теме. Определение актуальности проведения работы.	Инженер	16
3	Создание плана проведения работ. Формирование методики проведения работ по моделированию на основе ранее полученного опыта.	НР, Инженер	1
4	Монтирование экспериментальной установки и подготовка технического оборудования для эксплуатации	Инженер	3
5	Установка и обновление необходимого программного обеспечения	Инженер	1
6	Проведение работ по численному моделированию	Инженер	44

7	Обработка полученных результатов и проведения сравнительного анализа с результатами предоставленными другими экспериментаторами и предыдущими экспериментами	Инженер	9
8	Формирование отчетной документации по проведённой работе	Инженер	8
9	Утверждение проекта	НР, Инженер	6
10	ИТОГО	НР:8 дней, Инженер: 89 дней	

## 4.2 Смета затрат на проект

Смета затрат на проектирование математической модели рассчитывается по следующей формуле:

$$K_{эк.ис} = K_{mat} + K_{ам} + K_{з.пл} + K_{с.о} + K_{пр} + K_{накл} \quad (1)$$

где  $K_{mat}$  – материальные затраты;

$K_{ам}$  – амортизация;

$K_{з.пл}$  – затраты на заработную плату;

$K_{с.о}$  – затраты на социальные нужды;

$K_{пр}$  – прочие затраты;

$K_{накл}$  – накладные расходы.

### 4.2.1 Материальные затраты.

Под материальными затратами понимается величина денежных средств, потраченных на канцелярские принадлежности, необходимые для проведения работы. Величина этих затрат в данной работе составляет  $K_{mat} = 800$  руб.

### 4.2.2 Амортизация компьютерной техники.

В данной работе использовалась компьютерная техника для моделирования задачи в программе COMSOL Multiphysics.

$$K_{ам} = \frac{T_{исп}}{T_{календ}} \cdot Ц \cdot \frac{1}{T_{сл}}, \quad (2)$$

где  $T_{исп.}$  – время использования устройства;

$T_{календ.}$  – календарное время (365 дней);

$C$  – цена устройства;

$T_{сл}$  – срок службы устройства.

В экспериментальных исследованиях использовался компьютер intel® core™ i7-6700 CPU 3.40 GHz ОЗУ 16 Гб с монитором SAMSUNG S24D330, общей стоимостью 43500 рублей и сроком службы 7 лет. Таким образом, амортизация компьютерной техники составляет:

$$K_{ам} = \frac{T_{исп.}}{T_{календ.}} \cdot C \cdot \frac{1}{T_{сл}},$$
$$K_{ам} = \frac{89}{365} \cdot 43500 \cdot \frac{1}{7} = 1515 р.$$

#### 4.2.3 Затраты на заработную плату.

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы.

Расчёт месячной заработной платы:

$$ЗП_{мес.} = k_1 \cdot k_2 \cdot ЗП_о, \quad (3)$$

где  $k_1$  – коэффициент, учитывающий отпуск, равный 10% ( $k_1 = 1,1$ );

$k_2$  – районный коэффициент, равный 30% ( $k_2 = 1,3$ );

$ЗП_о$  – месячный оклад (инженер – 19000 руб., НП – 33000 руб.);

Фактическая заработная плата:

$$ЗП_{факт} = \frac{ЗП_{мес.}}{d} \cdot n^{факт}, \quad (4)$$

где  $ЗП_{мес.}$  – месячная зарплата;  $d$  – количество рабочих дней в месяце ( $d = 21$ );  $n^{факт.}$  – фактическое число дней в проекте.

Затраты на заработную плату складываются из заработных плат инженера и научного руководителя:

$$\Sigma ЗП = K_{з.пл} = ЗП_{инж}^{факт} + ЗП_{НР}^{факт}, \quad (5)$$

где  $ЗП_{инж}^{факт}$  – фактическая заработная плата инженера;

$ЗП_{НР}^{факт}$  – фактическая заработная плата научного руководителя.

Расчет затрат на заработную плату приведен в таблице 4.2.2

Таблица 4.2.1 – Затраты на заработную плату

Должность в ТПУ	Инженер	НР
$ЗП_{мес}$	$ЗП_{мес} = k_1 \cdot k_2 \cdot ЗП_{оклад},$ $ЗП_{мес} = 1,1 \cdot 1,3 \cdot 19000 = 27170 \text{ р}$	$ЗП_{мес} = k_1 \cdot k_2 \cdot ЗП_{оклад},$ $ЗП_{мес} = 1,1 \cdot 1,3 \cdot 33000 = 47190 \text{ р}$
$ЗП^{факт}$	$ЗП^{факт} = \frac{ЗП_{мес}}{d} \cdot n^{факт},$ $ЗП^{факт} = \frac{27170}{21} \cdot 89 = 115149 \text{ р.}$	$ЗП^{факт} = \frac{ЗП_{мес}}{d} \cdot n^{факт},$ $ЗП^{факт} = \frac{47190}{21} \cdot 8 = 17977 \text{ р}$
$K_{з.пл}$	$K_{з.пл} = 115149 + 17977 = 133126 \text{ р}$	

#### 4.2.5 Затраты на социальные нужды (отчисления).

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Принимаются в размере 30,2% от затрат на заработную плату:

$$K_{с.о.} = 0,302 \cdot K_{з.пл}; \quad (6)$$

$$K_{с.о.} = 0,302 \cdot 133126 = 40204 \text{ р.}$$

#### 4.2.6 Прочие затраты.

В эту статью включаются расходы по командировкам научного и производственного персонала, связанного с непосредственным выполнением конкретного проекта, величина которых принимается в размере 10% от основной и дополнительной заработной платы всего персонала, занятого на выполнении данной темы.

$$K_{np.} = 0,1 \cdot (K_{mat.} + K_{ам.} + K_{з.пл.} + K_{с.о.}); \quad (7)$$

$$K_{np.} = 0,1 \cdot (800 + 1515 + 133126 + 40204) = 17564 \text{ р.}$$

#### 4.2.7 Накладные расходы.

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др.

Принимаются в размере 16% от затрат на заработную плату:

$$K_{нак.} = 0,16 \cdot K_{з.пл.}; \quad (8)$$

$$K_{нак.} = 0,16 \cdot K_{з.пл.} = 0,16 \cdot 133126 = 21300 \text{ р.}$$

Смета затрат на экспериментальное исследование режимов работы двухфазного закрытого термосифона сведена в таблицу 4.3.

Таблица 4.2.2 – Смета затрат на проект

Элементы затрат	Стоимость, руб
1. Материальные затраты	800
2. Амортизация	1515
3. Затраты на заработную плату	133126
4. Затраты на социальные нужды	40204
5. Прочие затраты	17564
6. Накладные расходы.	21300
ИТОГО:	214530

Общие затраты на реализацию экспериментального исследования составят 214530 рублей.

#### 4.3 Определение ресурсной эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин:

финансовой эффективности и ресурсоэффективности. Так как определение финансовой эффективности не представляется возможным в данном случае, произведем оценку ресурсоэффективности научного исследования. Сравнение использованного метода было произведено с двумя ближайшими аналогами.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта;

$b_i^a, b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го варианта, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлены в форме таблицы.

Таблица 4.3 - Оценка ресурсной эффективности НИ

Критерии \ Объект исс-ия	Весовой коэффициент параметра	Используемый метод	Аналог 1	Аналог 2
Задание параметров материалов	0,139	4	3	4
Задание параметров физики	0,184	5	5	4
Наложение сетки	0,158	5	4	3
Создание геометрии	0,186	3	2	3
Решение модели	0,222	5	4	3
Постобработка результатов	0,111	4	4	5
ИТОГО:	1	4,75	3,67	3,54

Численное моделирование влияния радиационного теплопереноса в микросферах тонкопленочных теплоизоляционных покрытий на тепловые потери теплопроводов имеет место при проектировании, модернизации и эксплуатации тепловых сетей и энергетического оборудования. Также может быть использовано для полной оценки тепловых режимов ТТИ, снижения экономических затрат и экологических воздействий на окружающую среду. С точки зрения ресурсной эффективности, для решения поставленной в магистерской работе задачи был выбран наиболее подходящий и выгодный вариант, так как именно он имеет наибольший интегральный показатель ресурсоэффективности (4,75).

#### **4.4 Комплексный анализ научно-исследовательского проекта для исследования внутренней и внешней среды проекта.**

##### *Внутренние сильные стороны*

- Применение численного моделирования позволит уменьшить затраты при разработке теплоизоляционных конструкций;
- Применение полученных результатов в отрасли теплоснабжения;
- Получения новых, неопубликованных результатов.

##### *Внутренние слабые стороны*

- Ограниченная целевая аудитория;
- Перспектива замены оборудования.

##### *Внешние угрозы*

- Появление конкурентов в области программных разработок;

##### *Внешняя среда*

##### *Спрос, характер спроса*

Данное исследование позволит увеличить эффективность использования тепловой энергии, позволит уменьшить расход топлива на источнике производства.

### *Конкуренты*

Конкурентами являются теоретики в области моделирования тепловых процессов в трубопроводах с использованием новых видов тепловой изоляции.

### *Поставщики*

Поставщиками программного обеспечения для написания программ и обработки результатов является компания Comsol.

### *Контактная аудитория*

Результаты научного исследования будут полезны тем, кто имеет отношение к проектированию теплоизоляции систем теплоснабжения. А также, компаниям, деятельность которых связана с тепломассообменным оборудованием.

### *Аудиторией влияния*

Аудиторией влияния на программное обеспечение является администрация Томского Политехнического Университета.

### *Внутренняя среда*

#### *Продуктный продукт и его характеристики*

Продукт представляет собой программное обеспечение, результатами работы, которой является построение поля различных термодинамических параметров, зависящих от температуры в любой заданный промежуток времени.

#### *Обеспеченность, потребность в основных средствах*

Основными средствами является ЭВМ.

#### *Оборотный капитал*

Оборотный капитал отсутствует

#### 4.5 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения. Для этого составлена оценочная карта, приведенная в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1 Повышение производительности труда пользователя	0,18	4	2	3	0,72	0,36	0,52
2 Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,14	5	3	4	0,70	0,42	0,56
3 Энергоэкономичность	0,07	4	4	2	0,28	0,28	0,14
Экономические критерии оценки эффективности							
1 Конкурентоспособность продукта	0,09	5	3	3	0,45	0,24	0,24
2 Уровень проникновения на рынок	0,06	3	5	5	0,18	0,30	0,30
3 Цена	0,07	5	3	4	0,35	0,21	0,28
4 Предполагаемый срок эксплуатации	0,08	4	3	3	0,32	0,24	0,24
6 Финансирование научной разработки	0,04	4	4	5	0,16	0,16	0,20
7 Срок выхода на рынок	0,03	5	3	3	0,15	0,12	0,12
8 Финансирование научной разработки	0,05	4	3	5	0,20	0,15	0,25
Итого	1	58	47	51	4,46	3,38	3,75

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i,$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;  $V_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Таким образом, конкурентоспособность разработки составила 4,46, в то время как двух других аналогов 3,38 и 3,75 соответственно. Результаты показывают, что данная научно-исследовательская разработка является конкурентоспособной и имеет преимущества по таким показателям, как удобство в эксплуатации, надежность, цена, предполагаемый срок эксплуатации.



### **Вывод по разделу**

В результате исследований можно сказать о том, что нормативная методика расчета тепловой изоляции не в полной мере охватывает все факторы, влияющие на тепловые потери. Технологии применения тонкопленочных теплоизоляционных покрытий к настоящему моменту времени не получили развития. Это обусловлено рядом причин, основными из которых являются: недостаток знаний о физических свойствах и механизмах процессов теплопереноса в тонкопленочных теплоизоляционных покрытиях. При моделировании с программным комплексом COMSOL Multiphysics [49] можно учесть все влияющие факторы на теплоперенос в слое тонкопленочной тепловой изоляции.

## 5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Социальная ответственность – это сознательное отношение, какого-либо субъекта социальной деятельности к требованиям социальной необходимости, социальных ценностей, норм, задач и правил, а также гражданского долга, понимание субъектом последствий осуществляемой деятельности для определенных социальных групп и личностей, для социального прогресса общества.

Социальная ответственность подразделяется на корпоративную и индивидуальную. Корпоративная социальная ответственность – это идея в рамках которой организации учитывают интересы общества и возлагают на себя ответственность за влияние их деятельности на фирмы и прочие заинтересованные стороны современного общества. Согласно данной концепции организации добровольно принимают дополнительные меры для повышения качества жизни работников, их семей, а также местного сообщества и общества в целом. При этом корпорации получают многочисленные преимущества от того, что работают на более широкую и продолжительную перспективу, чем собственная краткосрочная прибыль.

Среди социальных вопросов на производстве особое место занимают работа по охране труда, окружающей среды и в чрезвычайных ситуациях. В процессе выполнения данной работы вопросы социальной ответственности затронули как непосредственных исполнителей работы (индивидуальная), так и Томский политехнический университет (корпоративная).

В данной работе проводились изучения влияния радиационного теплопереноса в микросферах тонкопленочных теплоизоляционных покрытий на тепловые потери теплопроводов. Значительные тепловые потери в системах теплоснабжения, оборудования энергетики и неудовлетворительное состояние их теплоизолирующего слоя, что в последствие может привести к аварийной ситуации, обосновывают

необходимость разработки новых технологий снижения уровня тепловых потерь в рассматриваемых системах.

Объектом исследования является нанесенный на трубопровод слой сверхтонкой теплоизоляции толщиной 0,33 мм, содержащий полые микросферы диаметром 50 мкм.

Основная часть моделирования состоит из проведения расчетов, составление таблиц и построение характерных графиков, иллюстрирующих распределение температурных полей исследуемой области. По результатам исследования проводится анализ и обработка результатов. Все вышеперечисленные работы проводятся с использованием ПЭВМ, в четвертом корпусе ТПУ, в компьютерном классе с помощью программного обеспечения с применением средств и функций пакета программ мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics с использованием модуля General Heat Transfer [49].

При выполнении НИРМ большую часть времени приходилось проводить в компьютерном классе 48-ой аудитории 4-го корпуса за выполнением расчетов и набором магистерской диссертации на компьютере. В данном разделе рассмотрены вопросы, связанные с охраной труда и техникой безопасности людей работающих в компьютерной лаборатории. По степени воздействия на организм человека отрицательные внешние факторы можно разделить на опасные и вредные. При работе в помещениях, в которых находятся вычислительная техника могут встречаться следующие опасные факторы: поражение электрическим током и возникновение пожара.

## **5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

### **5.1.1 Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства**

Согласно ТК РФ, N 197 -ФЗ работник аудитории 201, 4 корпуса ТПУ имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;

### **5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны**

Рабочее место в аудитории 48, 4 корпуса ТПУ должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78. Оно должно занимать площадь не менее 4,5 м<sup>2</sup>, высота помещения должна быть не менее 4 м, а объем - не менее 20 м<sup>3</sup> на одного человека. Высота над уровнем пола рабочей поверхности, за которой работает оператор, должна составлять 720 мм. Оптимальные размеры

поверхности стола 1600 x 1000 кв. мм. Под столом должно иметься пространство для ног с размерами по глубине 650 мм. Рабочий стол должен также иметь подставку для ног, расположенную под углом 15° к поверхности стола. Длина подставки 400 мм, ширина - 350 мм. Удаленность клавиатуры от края стола должна быть не более 300 мм, что обеспечит удобную опору для предплечий. Расстояние между глазами оператора и экраном видеодисплея должно составлять 40 - 80 см. Так же рабочий стол должен быть устойчивым, иметь однотонное неметаллическое покрытие, не обладающее способностью накапливать статическое электричество. Рабочий стул должен иметь дизайн, исключаящий онемение тела из-за нарушения кровообращения при продолжительной работе на рабочем месте.

Рабочее место сотрудника аудитории 48, 4 корпуса ТПУ соответствует требованиям ГОСТ 12.2.032-78.

## **5.2 Производственная безопасность**

Исследовательский стенд представляет собой компьютер со специальным программным обеспечением для моделирования процессов теплопереноса, обработки полученных данных и построения графических зависимостей, а также работы с пояснительной запиской, с точки зрения социальной ответственности целесообразно рассмотреть вредные и опасные факторы, которые могут возникать при работе с данным оборудованием, а также требования по организации рабочего места.

### **5.2.1 Анализ потенциально вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований**

Для выбора факторов использовался ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [2]. Перечень опасных

и вредных факторов, характерных для среды проектирования представлен в виде таблицы:

Таблица 5.2 - Опасные и вредные факторы при выполнении работ по исследованию изоляционных материалов

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
	+	+	+	
1. Воздействие электрического тока. 2. Отклонение показателей микроклимата в помещении. 3. Недостаточная освещенность рабочей зоны. 4. Воздействие электромагнитного излучения. 5. Повышенный уровень ультрафиолетовой и инфракрасной радиации. 6. Повышенный уровень шума на рабочем месте	+	+	+	1. С точки зрения электробезопасности (ГОСТ 12.1.030-81) оборудование, запитываемое напряжением выше 42 В. [38]. 2. Оптимальные и допустимые метеорологические условия температуры и влажности устанавливаются согласно ГОСТ 12.1.005-88 [39]. 3. В соответствии с характером выполняемых работ освещенность рабочего места по СНиП II-4-79 [40]. 4. Безопасные уровни излучений регламентируются нормами СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [41]. 5. Оценки радиации МСанПиН 001-96[42]. 6. Общие требования к уровню шума изложены в ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ [43].

Данное исследование непосредственно связано с компьютером, а, следовательно, с дополнительным воздействием целой группы вредных и опасных факторов, что существенно снижает производительность труда.

### *Воздействие электрического тока*

Электробезопасность в производственных условиях обеспечивается соответствующей конструкцией электроустановок, техническими способами и средствами защиты, организационными и техническими мероприятиями.

Травмы от поражения электрическим током могут быть получены в результате прикосновения человека к незащищенным токопроводящим элементам оборудования, случайного поражения статическим электричеством, образовавшимся на элементах электрооборудования, или в результате пробоя изоляции токопроводящих частей. Так же одной из причин является несоблюдение техники безопасности и правил эксплуатации оборудования.

### *Отклонение показателей микроклимата в помещении*

Особые требования предъявляются к микроклимату в помещении. Дело в том, что слишком высокая или чрезмерно низкая температура окружающего воздуха является одним из факторов, угнетающих работоспособность. Поэтому [31]:

- при температуре на улице ниже 10 °С в помещении должно быть не менее 22 – 24 °С тепла;
- при температуре на улице более 10 °С в помещении температура должна находиться в пределах 23 – 25 °С.

При несоблюдении этих нормативов продолжительность трудового дня сокращается согласно условиям СанПиН 2.2.4.3359-16 от 21.06.2016 № 81 [32].

В соответствии с СН-245-71 в помещении должен быть организован воздухообмен. Для улучшения воздухообмена необходимо выполнить следующие технические и санитарно-гигиенические требования: общий

объем притока воздуха в помещении должен соответствовать объему вытяжки; правильное размещение приточной и вытяжной вентиляции [36].

Рабочее помещение предназначено для организации легкой категории работ 1а. Работа за компьютером производится сидя и не требует приложения физического напряжения или переноски тяжестей. Нормы метеорологических условий учитывают время года и характер производственного помещения.

Микроклимат на рабочем месте в производственных помещениях определяется согласно [31, 39] температурой воздуха, относительной влажностью, скоростью движения воздуха, барометрическим давлением и интенсивностью теплового излучения от нагретых поверхностей.

В таблице 5.1.1.1 приведены нормы метеоусловий для категорий работ по тяжести 1а согласно [39].

Таблица 5.1.1.1 – Нормы метеоусловий

Холодный период года ниже +10, °С						Теплый период года +10, °С					
Оптимальные			Допустимые			Оптимальные			Допустимые		
воздуха, °С	влажность %	движения воздуха, м/с	воздуха, °С	влажность %	движения воздуха, м/с	Температура воздуха, °С	влажность %	движения воздуха, м/с	воздуха, °С	влажность %	движения воздуха м/с
22-24	40-60	Не более 0,1	20-25	15-75	Не более 0,3	23-25	40-60	Не более 0,1	21-28	15-75	0,1- 0,2

Данное помещение не имеет искусственной вентиляции. Воздухообмен осуществляется за счет естественного неорганизованного перемещения воздуха, направленного на вытяжку воздуха из помещения.

*Недостаточная освещенность рабочей зоны.*

В СанПиНе 2.2.1/2.1.1.1278-03 прописаны нормативы для освещения. Так, освещенность в помещении должна быть в пределах от 300 до 500 люкс. Если же без искусственного освещения обойтись нельзя, начальник должен постараться, чтобы оно обеспечивало хорошую видимость информации, выдаваемой экраном ПК. В качестве устройств для местного освещения можно использовать светильники, устанавливаемые на столах [35].

В соответствии с санитарными нормами и правилами качественное освещение играет важную роль в обеспечении безопасной и продуктивной работы. Освещение влияет на общее состояние человека его безопасность и производительность труда. Максимальная производительность труда соответствует оптимальной освещенности. При недостаточной или непостоянной освещенности орган зрения вынужден напрягаться и приспособливаться, что способствует ухудшению зрительного органа, потери внимательности, быстрой утомляемости человека [35, 40].

Помещения с постоянным пребыванием людей должны иметь естественное освещение. Также немаловажно наличие хорошего искусственного освещения, которое обеспечивает возможность работы в помещении в пасмурное или ночное время суток и при различных климатических условиях. Рассматриваемая аудитория относится к 1 группе, включающая помещения, в которых производится различение объектов зрительной работы при фиксированном направлении линии зрения, нормированное значение освещенности рабочей поверхности составляет 300 лк [40].

Поскольку естественное освещение не обеспечивает достаточную освещенность рабочих поверхностей, то используется так же и искусственное освещение за счет люминесцентных ламп. Согласно [40] при организации естественного освещения мониторы должны быть расположены боковой стороной по отношению к оконным проемам, так чтобы свет падал преимущественно слева. Для части рабочих мест в аудитории – это условие выполняется.

*Воздействие электромагнитного излучения.*

Монитор является сильным источником электромагнитного излучения, особенно его задние и боковые стенки, так как они не имеют специального защитного покрытия, которое есть у лицевой части экрана.

Допустимые значения параметров неионизирующих электромагнитных излучений от монитора компьютера [41] представлены в таблице 5.2.2.1

**Таблица 5.2.2.1 - Допустимые уровни ЭМП**

Наименование параметров		ВДУ
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот 2 кГц - 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м

В рассматриваемой аудитории применяются мониторы с использованием плоских жидкокристаллических дискретных экранов. Спектр излучения компьютера включает в себя рентгеновскую, ультрафиолетовую и инфракрасную области спектра, а также широкий

диапазон электромагнитных волн других частот. Опасность рентгеновских лучей считается пренебрежимо малой, поскольку этот вид лучей поглощается веществом экрана.

#### *Повышенный уровень ультрафиолетовой и инфракрасной радиации*

Максимальный уровень рентгеновского излучения на рабочем месте оператора компьютера обычно не превышает 10 мкбэр/ч, а интенсивность ультрафиолетового и инфракрасного излучений от экрана монитора лежит в пределах 10–100 [41, 42].

#### *Повышенный уровень шума на рабочем месте*

Максимальный порог уровня шума на производстве составляет 80 децибел. Эта информация содержится в СанПиНе 2.2.4.3359-16. В связи с этим требования к рабочему месту на производстве предусматривают при оборудовании помещения применение шумоизоляционных материалов [32].

Немаловажной частью обеспечения эффективной работы являются мероприятия по снижению уровня шума до комфортных значений. Шум оказывает негативное влияние на весь организм. Основным источником шумов в рассматриваемой аудитории является система охлаждения компьютерной техники. По характеру спектра данный шум является широкополосным. В соответствии с [32, 43] уровень шума на рабочем месте не должен превышать 80 дБ.

### **5.2.2 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя.**

#### *Обеспечение снижения уровня электромагнитного излучения*

Способы защиты от электромагнитного излучения компьютера:

а) как можно чаще прерывать работу, а также по возможности максимально сократить время работы за компьютером;

б) монитор и системный блок должен находиться как можно дальше от человека.

### *Обеспечение надлежащего микроклимата в помещении*

Количество приточного воздуха при естественной вентиляции должно быть не менее 30 м<sup>3</sup>/ч на одного человека, при объеме помещения приходящегося на него менее 20 м<sup>3</sup>. В рассматриваемом помещении располагается 9 рабочих мест при объеме помещения равном 252 м<sup>3</sup>. Таким образом, на каждого человека приходится приблизительно 28 м<sup>3</sup> пространства помещения. Таким образом, естественный воздухообмен не обеспечивает необходимые санитарные нормы и требует повышения качества вентиляции. Повышения качества вентиляции можно осуществить путем установки систем механической вентиляции и кондиционирования. Допустимые нормы по запыленности должны соответствовать санитарным нормам для ПДК веществ 4-ого класса опасности, более 10 мг/м<sup>3</sup>, и требуют влажной ежедневной двухразовой уборкой пола в помещении [36, 39].

### *Обеспечение санитарных норм по освещению*

Для обеспечения комфортной работы на всех рабочих местах ниже приведен расчет искусственного освещения рабочего помещения. Для обеспечения равномерного освещения в помещении используется общее освещение, т.к. нет необходимости в лучшем освещении отдельных участков.

В рабочем помещении, имеющем размеры: длину А, ширину В, высоту Н, используется система общего искусственного люминесцентного освещения и выполняется работа, требующая освещенности 300 лк. Дополнительные данные: высота рабочей поверхности -  $h_p$ , коэффициент отражения стен  $\rho_c$ , потолка -  $\rho_{п}$ , коэффициент запаса К, коэффициент равномерности освещения – Z.

Таблица 5.2.2.2 – Исходные данные

A(м)	B(м)	H(м)	$h_p$ (м)	$\rho_c$ (%)	$\rho_{п}$ (%)	К	Z
9	8	3,5	0,9	30	50	1,8	1,1

Площадь помещения:  $S=A \cdot B= 9 \cdot 8=72 \text{ м}^2$  Расстояние светильников от перекрытия (свес) примем  $h_c=0,5 \text{ м}$ . Выбираем светильники типа ОД с интегральным критерием оптимальности расположения светильников  $\lambda=1,4$   
Тогда:

- высота светильника над рабочей поверхностью находится по формуле:

$$H = H - h_c - h_p = 3,5 - 0,5 - 0,9 = 2,1 \text{ м};$$

- расстояние между светильниками:

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2,1 = 2,94 \text{ м};$$

Размещаем светильники в два ряда. В каждом ряду установлено по пять светильников типа ОД мощностью 30 Вт (с длиной 0,933 м), при этом разрывы между светильниками в ряду составят 50 см. Изображаем в масштабе план помещения и размещения на нем светильников (рис.5.2.2.1). Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении  $N= 20$ .

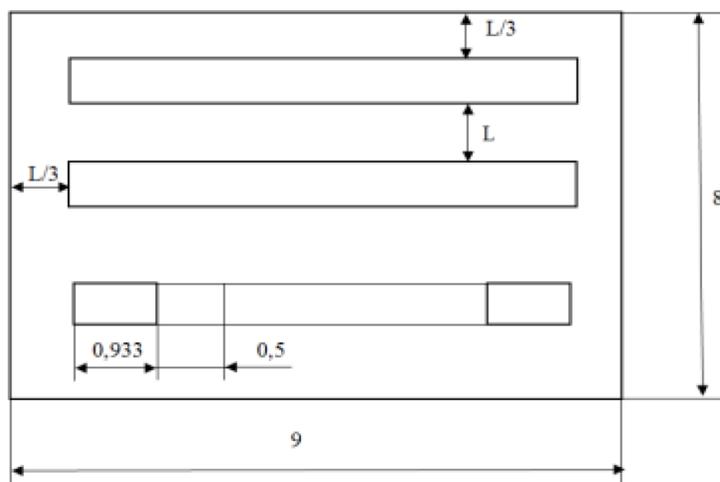


Рисунок 5.2.2.1 – Размещение искусственного освещения в рабочем помещении

Определим индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A+B)} = \frac{72}{2,1 \cdot (9+8)} = 2.$$

Определим  $\eta$  с учетом типа светильника и значений  $r_c$  и  $r_p$ :  $\eta=0,43$ .

Определим световой поток лампы  $\Phi$  по формуле:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta}$$

Выбираем ближайшую стандартную лампу – ЛХБ 80 Вт с потоком 5000 лм.

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{л.станд} - \Phi_{л.расч}}{\Phi_{л.станд}} \cdot 100\% \leq \pm 20\%$$

Получаем:

$$-10\% \leq 0,54\% \leq \pm 20\%$$

Определяем электрическую мощность осветительной установки:

$$P = 20 \cdot 80 = 1600 \text{ Вт}$$

Оптимальное светораспределение обеспечивается применением закрытых четырехламповых светильников с использованием люминесцентных ламп типа ЛБ. Созданное в аудитории искусственное освещение обеспечивает возможность работы в помещении в любое время суток и при любых метеоусловиях.

#### *Обеспечение санитарных норм по уровню шума*

В качестве мер по снижению уровня шума используется размещение вентиляторов в защитном кожухе внутри корпуса, либо улучшение конструкции персональных компьютеров.

#### *Обеспечение электробезопасности*

В связи с изложенными выше опасностями к самостоятельной работе в компьютерной аудитории допускаются лица, не моложе 18 лет, которые прошли инструктаж по технике безопасности. В рассматриваемом помещении, с целью снижения рисков поражения электрическим током, в оборудовании применяется изоляция токопроводящих элементов. Оборудование, находящееся под напряжением, имеет защитные кожухи, т.е. корпуса компьютеров. Они обеспечивают защиту от случайного прикосновения к токопроводящим элементам компьютера, а также

предохраняют оборудование от попадания в него посторонних предметов и влаги.

Для предупреждения и предотвращения электрическим током в помещении применяются следующие мероприятия:

- а) контроль состояния и своевременное устранение неисправности оборудования;
- б) регулярная проверка изоляции;
- в) соблюдение техники безопасности и правил работы с оборудованием;
- г) установка защитных устройств, таких как автоматические выключатели и сетевые фильтры.

На основе предыдущих исследований можно сделать вывод, что согласно действующими правилами устройства электроустановок данное помещение относится к помещениям с повышенной опасностью. В нем отсутствует искусственная вентиляция, а естественная не обеспечивает необходимой циркуляции воздуха, что приводит к периодическому длительному повышению температуры воздуха свыше 30 °С.

### **5.3 Экологическая безопасность**

В данном подразделе рассматривается характер воздействия проектируемого решения на окружающую среду. Выявляются предполагаемые источники загрязнения окружающей среды, возникающие в результате реализации предлагаемых в ВКР решений.

#### **5.3.1 Анализ влияния рабочей зоны для моделирования на окружающую среду**

Большинство компьютерной техники содержит бериллий, кадмий, мышьяк, поливинилхлорид, ртуть, свинец, фталаты, огнезащитные составы на основе брома и редкоземельные минералы [44]. Это очень вредные вещества, которые не должны попадать на свалку после истечения срока использования, а должны правильно утилизироваться.

Утилизация компьютерного оборудования осуществляется по специально разработанной схеме, которая должна соблюдаться в организациях:

1. На первом этапе необходимо создать комиссию, задача которой заключается в принятии решений по списанию морально устаревшей или не рабочей техники, каждый образец рассматривается с технической точки зрения.
2. Разрабатывается приказ о списании устройств. Для проведения экспертизы привлекается квалифицированное стороннее лицо или организация.
3. Составляется акт утилизации, основанного на результатах технического анализа, который подтверждает негодность оборудования для дальнейшего применения.
4. Формируется приказ на утилизацию. Все сопутствующие расходы должны отображаться в бухгалтерии.
5. Утилизацию оргтехники обязательно должна осуществлять специализированная фирма.
6. Получается специальная официальная формы, которая подтвердит успешность уничтожения электронного мусора.

После оформления всех необходимых документов, компьютерная техника вывозится со склада на перерабатывающую фабрику. Все полученные в ходе переработки материалы вторично используются в различных производственных процессах. [9]

### **5.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду**

Процесс исследования представляет из себя работу с информацией, такой как технологическая литература, статьи, ГОСТы и нормативно-техническая документация, а также разработка математической модели с

помощью различных программных комплексов. Таким образом процесс исследования не имеет влияния негативных факторов на окружающую среду.

#### **5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Компьютерная аудитория оборудована различными электрическими приборами, такими как персональные ЭВМ, системы освещения, неисправность или неправильное использование которых могут привести к короткому замыканию, что может привести к возгоранию. Установлены [44] общие требования пожарной безопасности к объектам защиты различного назначения.

Причины возникновения пожара в компьютерной аудитории могут быть:

1. Открытый огонь;
2. Электрические повреждения (короткое замыкание и т. д.).

Первая группа причин, включающая обращение с "открытым" и "закрытым" огнем, курение в неположенных местах, оставление без присмотра электронагревательных приборов и устройств. В целях противопожарной безопасности необходимо соблюдение предупредительных мер. Допускается работа только на исправных установках и приборах. К работе могут допускаться лица, прошедшие инструктаж, по технике безопасности. Здание 4-го корпуса ТПУ относится к группе негорючих помещений. Согласно нормам первичных средств пожаротушения ППР - 2012 с учетом наличия электроустановок напряжением до 1000 В, на 100 должны быть: один углекислотный огнетушитель типа ОУ-2, ОУ-5 или ОУ-8. Категория по пожарной опасности – В. 39

Вторая группа причин:

1. Короткие замыкания. В таких случаях сила тока достигает больших величин и сопровождается динамическим и тепловым воздействием;

2. Увеличение переходного сопротивления в местах соединения ответвлений, контактов, что вызывает местный нагрев, перегрев, воспламенение изоляции;
3. Неисправность электроустановок и электросетей, а также неправильное устройство электросетей и электрооборудования.

В этих случаях в аудитории предусмотрено аварийное отключение. На распределительном щите имеется рубильник, с его помощью можно обесточить все электрооборудование в помещении

С целью предотвращения пожаров необходимо:

1. Уходя из помещения проверить отключения всех электронагревательных приборов, электроустановок, а также силовой и осветительной сети;
2. Курить только в отведенных для этого местах;
3. В случае возникновения пожара приступить к его тушению имеющимися средствами и вызвать по телефону "01" (010 для мобильной связи) пожарную команду;
4. Сотрудники аудитории должны быть ознакомлены с планом эвакуации людей и материальных ценностей при пожаре. План эвакуации должен находиться в каждом помещении и на каждом этаже лестничной клетки (рис. 5.4.1).

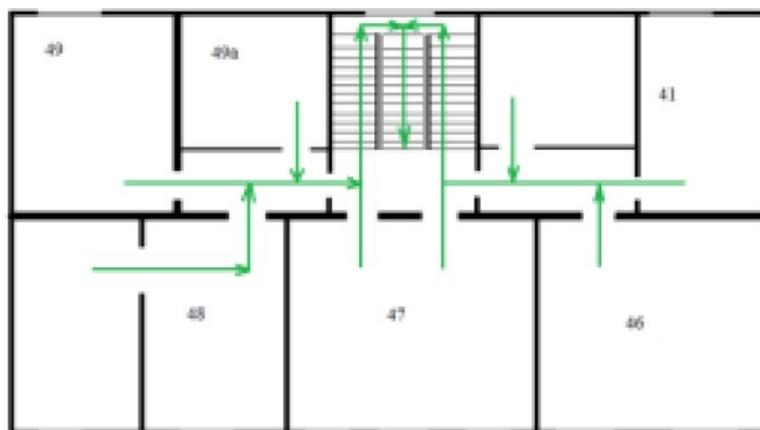


Рисунок 5.4.1 – План эвакуации при пожаре

Сотрудники лаборатории должны быть ознакомлены с планом эвакуации людей и материальных ценностей при пожаре. План эвакуации должен находиться в каждом помещении и на каждом этаже лестничной клетки.

### **Выводы по разделу**

После проведенного анализа основных вредных и опасных факторов в исследуемой аудитории можно сделать вывод, что в ней предусмотрены все необходимые меры по предотвращению возможностей возникновения ЧС и снижению их последствий. В аудитории установлены средства обнаружения возгорания и оповещения, а в непосредственной близости от помещения расположены средства первичного пожаротушения. Электрооборудование заключено в защитные кожухи, токопроводящие элементы имеют исправную изоляцию. Помещение снабжено аварийным выключателем для обесточивания оборудования.

В помещении обеспечивается низкий уровень электромагнитного излучения, запыленности и шума. Основным недостатком данного помещения, ухудшающим условия труда, является отсутствие искусственной вентиляции, а также недостаточно приемлемый уровень освещенности с использованием совместного освещения. В теплое время года недостаточный приток свежего воздуха приводит к периодическому превышению допустимой температуры в аудитории.

## Список использованных источников

1. Логинова Н. А. Определение эффективности тонкопленочных теплоизоляционных покрытий применительно к системам теплоснабжения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2010. – 20 с.
2. Wang H., Wang H., Haijian Zh., Zhu T. Optimization modeling for smart operation of multi-source district heating with distributed variable-speed pumps // *Energy*. – 2017. – V. 138. – P. 1247–1262.
3. Duquette J., Rowe A., Wild P. Thermal performance of a steady state physical pipe model for simulating district heating grids with variable flow // *Applied Energy*. – 2016. – V. 178. – P. 383–393.
4. Wanga Y., Youa S., Zhanga H., Zhenga X., Zhenga W., Miaoa Q., Luc G. Thermal transient prediction of district heating pipeline: Optimal selection of the time and spatial steps for fast and accurate calculation // *Applied Energy*. – 2017. – V. 206. – P. 900–910.
5. Ertürk M. Optimum insulation thicknesses of pipes with respect to different insulation materials, fuels and climate zones in Turkey // *Energy*. – 2016. – V. 113. – P. 991–1003.
6. Loginova N.A. Grigorev S.V., Lapin E.E., Pogorelov S.I., Ryzhenkov A.V. Choice and optimization of ratio of components to develop fast-mounted thermostable heat-insulating constructions // *Thermal Engineering*. – 2016. – V. 63 (5). – P. 355–359.
7. Половников В.Ю. Кондуктивный теплоперенос в слое тонкопленочной тепловой изоляции // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 189–197.
8. Chou H.M., Chen C.R., Wu T.N. New transparent thin films for thermal insulation // *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers. Transactions of the Chinese Institute of Engineers. Series C*. – 2015. – V. 36 (1). – P. 85–90.
9. Kim H., Jang J., Shin S., Park Y., Kim S., Kim H.R., Hyun B., Kim J. The evaluation of energy saving using ultrathin heat insulation in railway electrification substation // *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*. – 2015. – V. 64 (1). – P. 171–175.
10. Qi Y., Yin X., Zhang J. Transparent and heat-insulation plasticized polyvinyl chloride (PVC) thin film with solar spectrally selective property // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2016. – V. 151. – P. 30–35.
11. Patankar S.N., Kranov Y.A. Hollow glass microsphere HDPE composites for low energy sustainability // *Materials Science and Engineering*. – 2010. – V. 527. – P. 1361–1366.

12. Wang H., Fang H.J., Lan Q.D., He S., Jiang C. Effect of hollow glass microsphere thin film on heat-insulation performance of building envelope // Shanghai Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Shanghai Jiaotong University. – 2014. – V. 48 (9). – P. 1341–1345.
13. Liao Y., Wua X., Liua H., Chen Y. Thermal conductivity of powder silica hollow spheres // *Thermochimica Acta*. – 2011. – V. 526. – P. 178–184.
14. Fiedler T., Löffler R., Bernthaler T., Winkler R., Belova I.V., Murch G.E., Öchsner A. Numerical analyses of the thermal conductivity of random hollow sphere structures // *Materials Letters*. – 2009. – V. 63. – № 13–14. – P. 1125–1127.
15. Ryzhenkov A.V., Lapin E.E., Loginova N.A., Sitdikov D.R., Grigorev S.V. Evaluation of the thermal efficiency of a high-temperature heat-insulation structure based on honeycomb plastic // *Thermal Engineering*. – 2016. – V. 63 (6). – P. 445–448.
16. Belyaeva E.V., Loginova N.A., Lapin E.E., Pogorelov S.I., Ryzhenkov A.V. Investigation of heat capacity of syntactic foam based on silicone and organic matrix // *Oil Industry*. – 2016. – № 11. – P. 116–119.
17. Osipchik V.S., Kostromina N.V., Olikhova Y., Ivashkina V.N., Belyaeva E.V., Loginova N.A., Ryzhenkov A.V., Lapin E.E. Study of the influence of the modification of glass microspheres on the properties of syntactic foams based on oligomethylsiloxane // *International Polymer Science and Technology*. – 2016. – V. 43 (7). – P. 133–137.
18. Levitin S.V., Belyaeva E.V., Loginova N.A., Lapin E.E., Ryzhenkov A.V. Study of relations components for making flexible polymer insulation with optimum thermal and mechanical characteristics // *Oil Industry*. – 2015. – № 9. – P. 130–133.
19. Ryzhenkov A.V., Loginova N.A., Belyaeva E.V., Lapin Y.Y., Prischepov A.F. Review of binding agents in syntactic foams for heat-insulating structures in power industry Facilities // *Modern Applied Science* – 2015. – V. 9. – № 4. – P. 96–105.
20. Varavka V.N., Kudryakov O.V., Ryzhenkov A.V., Kachalin G.V., Zilova O.S. Application of nanocomposite coatings to protect power equipment from droplet impingement erosion // *Thermal Engineering*. – 2014. – V. 61. – № 11. – P. 797–803.
21. Kudryakov O.V., Varavka V.N. Integrated indentation tests of metal-ceramic nanocomposite coatings // *Inorganic Materials*. – 2015. – V. 51. – № 15. – P. 1508–1514.
22. Zhang Z. *Nano/Microscale Heat Transfer*. – New York: McGraw-Hill, 2007. – 479 c.

23. Flik M., Choi B., Goodson K. Heat Transfer Regimes in Microstructures // Journal Heat Transfer. – 1992. – V. 114. – P. 667–674.
24. Bynum R.T. Insulation Handbook. – New York: McGraw-Hill, 2001. – 494 с.
25. Bejan A. Convection heat transfer. – New York: Wiley, 2004. – 696 с.
26. Garcia A.L. Numerical methods for physics. – San Jose CA: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015. – 432 с.
27. Lovell M. C., Avery A. J., Vernon M. W. Physical Properties of Materials, New York: The Modern University, 1976 – 304 с.
28. Анисимов М.В., Лычагин Д.В., Рекунов В.С., Таалайбеков Ж.Т. Экспериментальное определение интегральной степени черноты сверхтонких жидких композиционных теплоизолирующих покрытий // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 5. – С. 106–115.
29. Половников В.Ю. Кондуктивно-конвективный теплоперенос в тонкопленочной тепловой изоляции // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 000–000. в печати.
30. A Hashemi, H Cruickshank, A Cheshmehzangi Environmental impacts and embodied energy of construction methods and materials in low-income tropical housing // Sustainability, 7 (6) (2015), pp. 7866-7883
31. A. Koenen, C. Stacey, E. Rasmussen, R. Schreiner, G. Swolek, T. Linsinger, ADDENDUM TO Certification of a Resin-Bonded Glass Fibre Board for Thermal Conductivity between  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . // IRMM-440, EUR 19572 EN, 2015. doi: 10.2787/653009.
32. T.T. Chow, C.Y. Li Liquid-filled solar glazing design for buoyant water-flow // Build Environ, 60 (2013), pp. 45-55.
33. Байбаков С.А., Тимошкин А.С. / Методики определения и оценки фактических тепловых потерь через изоляцию в водяных тепловых сетях систем централизованного теплоснабжения без отключения потребителей // Новости теплоснабжения. 2009, № 5 (105), www.ntsnn.ru.
34. СНиП 41-02-2003. Тепловые сети.
35. Рыженков В. А., Логинова Н. А., Прищепов А. Ф. Эффективность тонкопленочных теплоизоляционных покрытий при использовании микросфер для систем теплоснабжения // Надежность и безопасность энергетики. – 2012. – №2. – с. 61–63.
36. Ширинян В.Т. О целесообразности использования ЖКП. // Научно-технический журнал. 2007. №9(85).
37. Артамонова М. В. Основы технологии стекла. М.:// Главмоспромстройматериалы, –1977. –75 с.

38. Закирова И.А. , Чичирова Н.Д. Совершенствование тепловой изоляции тепловых сетей с применением тонкопленочных покрытий //Труды Академэнерго. 2016 (3):43-57
39. Планирование на предприятии: Учебник. – 4-е изд., испр. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2013. – 411 с.
40. Фатхутдинов Р.А. Производственный менеджмент: Учебник для вузов.6-е изд. – СПб.: Питер, 2008. – 496 с.
41. Бухалков М.И. Производственный менеджмент: организация производства: Учебник. – 2-е изд. – М.: ИНФРА-М, 2015. – 395 с.
42. Справочник экономиста промышленного предприятия / Под науч. ред. проф. С.Е. Каменицера. – М.: Экономика, 1978. – 663 с.
43. ГОСТ 2.103-68. Единая система конструкторской документации. Стадии разработки. – Введ. 1971.01.01 Текст. М. : Издательство стандартов, 2007. 9 с.
44. Видяев И.Г., Серикова Г.Н., Гаврикова Н.А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.-Томск: ТПУ, 2014. – 37 с.
45. Методические указания по разработке раздела «Социальная ответственность» выпускной квалификационной работы магистра, специалиста и бакалавра всех направлений (специальностей) и форм обучения ТПУ, Томск 2019
46. ГОСТ 12.0.003-2015 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация, 2015
47. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий, 2003
48. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы, 2003
49. СанПиН 2.2.4.1191-03 Электромагнитные поля в производственных условиях, 2003
50. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение, 2016
51. СанПиН 2.2.4.548–96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений, 1996
52. СН 2.2.4/2.1.8.562–96, Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки, 1996
53. ГОСТ 30494-2011, Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях, 2011
54. ГОСТ 12.4.124-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования, 1984

55. Пожарная безопасность серверной комнаты [Электронный ресурс]URL: <https://avtoritet.net/library/press/245/15479/articles/15515>, Дата обращения: 10.03.2019
56. Системы противопожарной защиты УСТАНОВКИ ПОЖАРНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ И ПОЖАРОТУШЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИЕ, 2009
57. НПБ 105-03, Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности, 2003
58. Трудовой кодекс Российской Федерации" от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 24.04.2020)
59. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя, 2017
60. ПРАВИЛА УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК. Седьмое издание, 2002
61. Специальная оценка условий труда в ТПУ. 2018.
62. Дашковский А.Г. Расчет устройства защитного заземления. Методические указания к выполнению самостоятельной работы по дисциплине «Электробезопасность» для студентов всех специальностей ЭЛТИ. Томск, изд. ТПУ, 2010. – 8 с.
63. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 472 с.
64. Бабичев Н. А. Физические величины: Справочник. – М.: Энерго- атомиздат. –1991. –1232 с.
65. Childs G. E., Hanley H. J. M. // Cryogenics. 1968. Vol. 8, №2. P.94 –
66. Бирюлин Г.В. Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL/FEMLAB. СПб.: СПбГУИТМО, 2006. – 89 с.

**Приложение I**  
(Справочное)

NUMERICAL SIMULATION OF THE EFFECT OF RADIATION HEAT  
TRANSFER IN MICROSPHERES OF THIN-FILM INSULATION COATINGS  
ON HEAT LOSS OF HEAT PIPELINES

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ83	Суслов Михаил Сергеевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И. Н. Бутакова ИШЭ	Половников В.Ю.	к.т.н., доцент		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ШБИП ОИЯ	Костомаров П.И.	к.ф.н., доцент		

## **Introduction**

Rational consumption of energy resources, issues of energy efficiency and security in the energy sector are a priority for the development of our state. Accounting for the amount of energy consumption and the conditions for their transportation are important issues of energy conservation at the moment.

The relevance of these issues is due to the significant duration of the heating period (for the Tomsk region it is more than 230 days, and in some Northern regions heating is carried out all year round), a fairly low average annual ambient temperature below -5 °C. Heat losses during the transportation of heat energy exceed 70 million t. t. per year with a total consumption of heat resources of 400 million t.t. per year. Annual energy losses in our country are comparable to the annual energy consumption of the industrially developed countries of the European Union [5]. This large-scale problem is explained by the large length of pipelines of heating networks, of which about 23 % is in an emergency state.

To increase the energy efficiency of heat supply systems, it is necessary to reduce excess heat losses caused by leakage of heat carriers and heat losses from the surface of heat pipelines, including due to unsatisfactory technical condition of thermal insulation structures of pipelines and equipment. In traditional types of thermal insulation, there is a decrease in thermal protection properties during operation, this is due to structural features, the influence of which is mainly due to open porosity.

It is known that an effective way to reduce heat energy losses during storage and transportation is to use highly efficient thermal insulation materials [7-10] that meet modern requirements. This type of material is thin-film thermal insulation materials, which are made of hollow microscopic spheres and various composition of binding components. This coating is easily applied to any surface, even complex geometric shapes, using a spray gun or roller. However, the thermophysical properties of these materials have not been fully studied to date [8]. The same material may have significantly different thermal conductivity. [11,12].

Quite a large number of works are devoted to studies of thin-film thermal insulation and the effectiveness of its application, as well as heat transfer in its layer [11-26]. These papers cover the issues of technology for using light-transmitting thin-film heat-protective coatings [13-17], conductive heat transfer in a layer of thin-film thermal insulation [12, 18, 19], as well as various practical applications [20-26], which study the influence of operating conditions of thin-film thermal insulation on the level of heat losses of equipment and pipelines.

Studies [7] have shown that heat transfer in gas-filled cavities of microspheres can be carried out due to thermal conductivity, convection, and radiant heat exchange. In modern scientific literature [7-26], there is no description of the influence of heat transfer mechanisms in thin-film thermal insulation coatings on the intensification of heat losses of power equipment. For this reason, to assess the effect of radiant heat transfer, it is necessary to study the coupled conductive-convective-radiative heat transfer in the system under consideration.

Relevance of the work. Currently, the state of heating networks in Russia is assessed as unsatisfactory. In this regard, there is a need to develop modern technologies in the field of thermal protection and modernization of existing types of thermal insulation. Thin-film thermal insulation coatings have unique thermal properties, which finds them a wide range of applications in the field of energy supply. However, this technology is not widely used, due to the lack of knowledge about the physical properties of these materials and the processes of heat and mass transfer occurring in them. In addition, at the moment there is not enough objective research that would give accurate and confirmed information about the optimal composition of components and the structure of these materials, which provided maximum efficiency in their operation.

The object of research is a thin-film thermal insulation material, the actual composition of which is a trade secret and is not disclosed by manufacturers.

The subject of the study is the analysis of the influence of radiation heat transfer in microspheres of thin-film thermal insulation coatings.

Practical significance of the results. Studies have shown that the use of this material is possible in the energy sector to reduce heat losses from the surfaces of pipelines of heat networks and various types of power equipment.

The aim of this work is to study the effect of radiation heat transfer in microspheres of thin-film thermal insulation coatings on heat losses of heat pipelines using numerical modeling.

## **1. Classification and characteristics of thermal insulation materials of heat pipelines and equipment.**

### **1.1 characteristics and requirements for thermal insulation**

#### **1.1.1 Porosity**

The main and general requirement for thermal insulation, which determines their main technical properties, is high porosity.

The porosity of thermal insulation is the ratio of the total volume of all the pores in the material to the total volume of the material. The density of thermal insulation materials mainly depends on the chemical nature of the material and porosity. In this case, the term "density" means the average density, which takes into account the actual density of the solid substance from which the material frame is built, and the density of air that fills the pores in the frame. The value of porosity and density of the material are related by the inverse ratio, that is, the greater the porosity, the lower the density of the material itself [26].

#### **1.1.2 Density**

Density insulation boards that are designed for the insulation of buildings and structures must be: - mineral wool – not less than 160 kg/m<sup>3</sup>; - slabs of foamed bead polystyrene not less than 25 kg/m<sup>3</sup>; slabs of foamed polystyrene of a melt – 30-38 kg/m<sup>3</sup>. The most important indicator of the quality of insulation is the thermal conductivity. As a result of their high porosity, thermal insulation materials should have low thermal conductivity coefficients and high thermal

insulation performance. Since highly porous materials are two-phase element systems that consist of a solid that creates the pore walls (framework), and air that fills the pores, their thermal conductivity depends on the thermal conductivity of the solids that create the framework, and the thermal conductivity of the air. Numerical values of thermal conductivity coefficients of thermal insulation depend on the chemical nature of the solid phase (frame): porosity, pore size, pore type (closed or open), average density of the material, as well as the conditions of their storage, use and operation. For thermal insulation boards that are used in the device of external thermal insulation of the house, the thermal conductivity coefficients at a temperature of  $298 \pm 5$  K should not be more than: - mineral wool boards- $0.05$  W/(m·K); - Styrofoam boards- $0.042$  W/(m·K). The porous structure of thermal insulation materials causes capillary and hygroscopic moisture, which worsens the main properties of materials: thermal conductivity, density, strength. Humidification of materials depends on the presence of a large number of open pores that are associated with the external natural environment and through which moisture enters the material from this environment. The moisture content of thermal insulation (humidity) is expressed as a percentage of the mass (for mineral wool slabs) and by volume (for polystyrene slabs). The humidity of the plates that come to the object for its insulation should not exceed 1%. Since the humidity of the plates that are obtained from foamed beaded polystyrene, immediately after their manufacture is 12%, they must be kept at a temperature of  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  in a closed, ventilated area for at least two months from the date of their manufacture.

### **1.1.3 Water Absorption**

Water absorption of thermal insulation is the property of a material to absorb a certain amount of water and hold it in its pores. Water absorption is characterized by the amount of water that is absorbed by the thermal insulation sample when it is kept in water 10 for a certain time, attributed to the mass of the dry sample, and expressed as a percentage. Thermal insulation with mostly closed pores has a lower water absorption than material with open pores. Water absorption of thermal

insulation, which is used in the device of home insulation, should not exceed 24 hours:

- mineral wool slabs 30% (by weight);
- Styrofoam boards 2.0% (by volume).

Thermal insulation materials must have a certain vapor permeability, that is, "breathe". The use of vapor-permeable materials for external thermal insulation of buildings contributes to the creation of an optimal moisture-air regime in the premises of the house, as well as increasing the durability of external enclosing structures by increasing their resistance to external influences of negative and positive temperatures [24].

#### **1.1.4 Water vapor Permeability**

Vapor permeability of thermal insulation is the property of a material to pass water vapor through its entire thickness in the presence of pressure and temperature differences. The vapor permeability of thermal insulation materials should not be less than:

- Styrofoam boards-0.03 mg/(m·h·PA);
- mineral wool plates-0.3 mg/(m h·PA).

#### **1.2 Classification of thermal insulation.**

The amount of heat loss from the surface of heat pipelines may depend on various factor, such as the length, diameter, material of thermal insulation, temperature schedule, technical condition of heat pipelines, their service life.

The method of thermal insulation of heat pipelines is selected depending on the geometric parameters of the pipeline, the operating temperature of the heat carrier, the type of laying of the heat network[26].

For thermal insulation materials for pipelines and devices, the most important parameter is the coefficient of thermal conductivity, and the lower its

value, the less heat loss will be during the production and transportation of heat resources. Not unimportant is such a parameter as the operating temperature range and operating conditions of the heat network.

The characteristics of insulation are characterized by very low thermal conductivity ( $\lambda < 0.18 \text{ W / m K}$ ) and a small density that does not exceed  $600 \text{ kg/m}^3$ . They are used for thermal insulation of all external building structures, as a sound insulation of premises - for internal walls and partitions, as well as for thermal insulation of various thermal units, heat pipes and refrigeration equipment.

Materials for thermal insulation are very diverse, so they are classified according to many parameters.

Classification of thermal insulation materials and their characteristics, depending on the structure:

- Fibrous. These include mineral wool and fiberglass insulation of organic and inorganic origin, consisting of fibers. Heat transfer in such materials is carried out from fiber to fiber when touching, the smaller the cross-section of the fiber, the higher the thermal insulation properties. The minimum thickness of inorganic fibers is 5-8 mm. if this value is exceeded, the strength of the fibers is violated;
- Granular. These include exfoliated vermiculite, slag, perlite and assured;
- Cellular. This group includes various types of foam, foam glass, cellular concrete structures, and vulcanite slabs.

Depending on the shape and appearance, insulation is divided into:

- Single-piece. This type includes blocks, bricks, slabs made of heat-insulating materials, heat-insulating cylinders and semi-cylinders, PU shells for pipe insulation, segments, and other products;
- Rolled and corded. These include various sewing mats, harnesses and cords.

- Loose and loose - mineral, basalt and glass wool, perlite sand, etc.

According to the degree of combustibility, modern thermal insulation materials are divided into:

- Fireproof (mineral wool, expanded clay, cellular concrete, etc.)
- Difficult to burn (xylolite, cement-chip)
- Combustible cellular (peat, reeds, various plastics)

Depending on the raw materials, insulation materials are divided into:

- Inorganic (various types of mineral wool and products based on it, glass fiber and products made from it, asbestos, as well as materials containing it, expanded vermiculite and perlite, cellular materials, diatomite-trepel, aluminum foil)
- Organic (peat products, wood-fiber boards, cellulose fibre insulation, the plastic foams, the foams). The technology of thermal insulation materials, in which the insulation is made from a mixture of raw materials of organic and inorganic origin, with an excess of inorganic raw materials by more than 50% of the mass, allows you to obtain an inorganic material.

According to the content of the binder, materials and products are divided into:

- Modern thermal insulation materials that contain a binder (cellular concrete, fibrolite, etc.);
- Insulation that does not contain a binder (glass and mineral wool fibers).

According to the density of insulation is divided into:

- Having a particularly low density - 15,25,35,50,75;
- Having a low density - 100,125,150,175;
- Having an average density - 200,225,250,300,350;
- Dense - 400,450,500,600.

If for insulation materials that have rigidity, the density corresponds to the ratio of the mass of the material in the dry state to its volume, then for fibrous insulation, this ratio is determined when it is exposed to a given load.

By compression ratio, materials are classified into:

- Soft (M) - over 30
- Semi-rigid insulation (PJ) - 6-30
- Rigid thermal insulation (W) - up to 6;
- Materials of increased rigidity ( PP) - up to 10 (when exposed to a pressure of 40 N / kV. cm)
- Solid - up to 10 (under pressure of 100 N / sq. cm).

The properties of a material to change its thickness under the influence of a certain pressure is called compression.

Classification of modern thermal insulation materials by thermal conductivity:

- Low-0.06 W/(m \* °C);
- Average-0.06 - 0.115 W/ (m \* °C);
- Increased - 0.115-0.175 W/ (m \* °C).

The density of insulation materials is an indicator of quality, so these data must be entered in the marking of the material.

Types of insulation:

- Mineral and non-mineral wool (having a glass, stone, cellulose base)
- Thermal insulation blocks (aerated concrete, foams and other plate heat insulation materials for walls and floors)
- Thin-sheet thermal insulation;
- Thermal insulation materials for pipes;
- Sealing tapes, cords and profiles;

- Foaming sealant;
- Backfill insulation;
- Asbestos insulation materials.

Raw materials for the production of thermal insulation materials are mineral, composite and polymer materials. The complex use of thermal insulation with various types of steam and waterproofing film and membrane materials, the use of sheet metal and foil as a shielding protective layer can significantly increase the service life of the insulation in any most aggressive operating conditions.

### **1.3 Thin-Film thermal insulation coatings**

Due to the high rate of development of science, every year on the market of thermal insulation materials there are modern and more advanced types of insulation, which are designed to provide a greater degree of efficiency, relatively low cost and solve a number of engineering problems that are relevant today.

From what was mentioned above, we can distinguish one fundamentally new material that has recently appeared on the domestic market, and which has already proven itself in the field of heat supply and construction. This is a thin-film insulation coating. It is also called ultra-thin or ceramic thermal insulation. It is a binder (usually mainly acrylic polymers, but there are also water-based compositions), which includes different types of microspheres as a filler at different concentration ratios. Such materials have the physical properties of paints, but due to the introduction of microspheres in them, they have a reduced value of the thermal conductivity coefficient. Data on the thermal conductivity coefficients of these materials differ everywhere and are very contradictory. For example, in various sources containing technical instructions and instructions for the operation of ultra-thin liquid thermal insulation, the coefficient of thermal conductivity is in the range, which indicates too large and uncertain spread of values [1]. Therefore, the estimation of the thermal conductivity coefficient of thin-film insulation coatings and the expansion of their applications are quite relevant tasks at the moment.

As mentioned above, this material can consist of hollow spheres filled with air or gas phase, vacuumed or solid microspheres of different diameters. They can have a ceramic, silicate or glass composition, and can also consist of ceramic elements, foam glass, perlite and various fillers, which in turn give this material a porous structure and provide high thermal insulation properties. All of the above elements are found in a binding viscous substance (acrylic polymer), the physical properties of which are similar to paint.

By the nature of origin, there are two types of microspheres. Microspheres of the first type are produced by burning coal ground to fine particles. The second type is obtained from specially prepared glass melts, which are then subjected to supercooling. Such melts of glass are called Frit. If we talk about hollow microspheres, then there are thin-walled and thick-walled microspheres. In thin-walled microspheres, the wall thickness usually does not exceed 10% of the sphere's diameter, and the advantage is the increased volume of the gas or air phase inside relatively thick-walled microspheres, which increases the insulation efficiency. On the other hand, the disadvantage in comparison with thick-walled spheres is the high brittleness and low density of thin-walled microspheres [4]. Figure 1.1.3 shows the structure of a type of energy-saving paint with hollow microspheres in an acrylic polymer under a microscope.

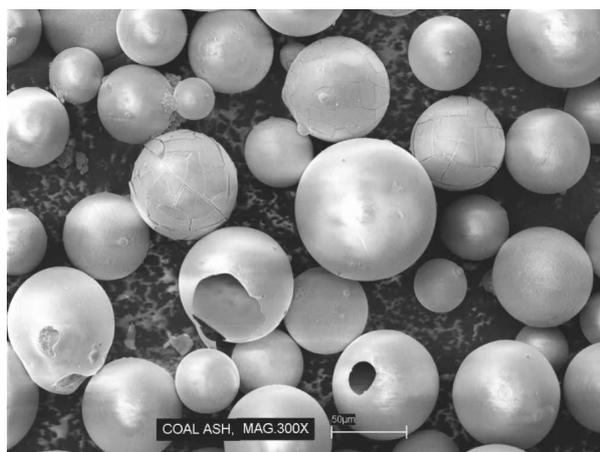


Figure 1.2.1 Structure of energy-saving paint with hollow microspheres

The diameters of the microspheres can be in the range of 0.015-0.5 mm. Depending on the composition and type, this energy-saving paint can be dissolved with water or organic solvents, such as acetone and various alcohols. Therefore, it can be both harmless and non-toxic, as well as toxic and representing any harm to health, as well as the environment in certain circumstances. The material is applied with a brush, roller or spray gun in a thin layer. The subsequent layers are applied only after the previous ones have completely dried. This liquid thin-film insulation has an average operating temperature of -60 to 120 and is applicable to a fairly wide type of surface, among which there are metal, wood, brick, concrete and others. But it should be noted, as noted in the publication [2], the use of TTI as a full-fledged insulation of heat pipelines is economically unprofitable. To obtain coating characteristics that meet the requirements of regulatory documentation, multiple coating application with layer-by-layer drying is required to obtain the necessary layer thickness, which is impractical and non-technological. Microspheres are currently manufactured in Russia mainly from borosilicate glass [3].

## References

1. Sokolov E. Ya. Heating and heating networks. M.: Izd-vo MEI, 2001. - 472 p.
2. Babichev N. A. Physical quantities: Reference book. - Moscow: Energo-Atomizdat. -1991. -1232 p.
3. Childs G. E., Hanley H. J. M. // Cryogenics. 1968. Vol. 8, No. 2. P. 94 –
4. Ryzhenkov V. A., Loginova N. A., Prishchepov A. F. Determination of the thermal conductivity coefficient of a thin-film thermal insulation coating at different diameters of gas-filled microspheres // Reliability and safety of energy. - 2010. - №2. - p. 28-30.
5. Loginova N. A. Determining the effectiveness of thin-film thermal insulation coatings in relation to heat supply systems: author's abstract ... Cand. tech. sciences'. Moscow, 2010. 20 p.
6. Wang H., Wang H., Haijian Zh., Zhu T. optimization modeling for intelligent operation of multi-source district heating with distributed variable-speed pumps // Energetika. - 2017. - St. 138. - P. 1247-1262.
7. Duquette J., Rowe A., Wild P. thermal characteristics of a stationary physical model of a pipe for modeling district heating networks with variable flow // Applied power engineering. - 2016. - St. 178. - P. 383-393.
8. Vanga Yu., Yu Yam S., Zhanga N., Zhenga H., U. Zhenga, V. Miaoa, Luke G. thermal transient forecasting of the district heating pipeline: optimal selection of time and space steps for fast and accurate calculation // Applied energy. - 2017. - St. 206. - P. 900-910.
9. Erturk m. Optimal thickness of pipe insulation in relation to various insulation materials, fuel and climate zones of Turkey // Energetika. - 2016. - St. 113. - P. 991-1003.
10. Loginova n. a., Grigoriev S. V., Lapin E. E., Pogorelov S. I., Ryzhenkov A.V. Selection and optimization of the ratio of components for the development of fast-built thermostable thermal insulation structures // teplotekhnika. - 2016. - St. 63 (5). - P. 355-359.
11. Polovnikov V. Yu. conductive heat transfer in a layer of thin-film thermal insulation // News of Tomsk Polytechnic University. Engineering of geo-resources. - 2019. - Vol. 330. - No. 5. - P. 189-197.
12. Chou H. M., Chen C. R., Wu T. N. new transparent thin films for thermal insulation // journal of the Chinese society of mechanical engineers. Proceedings of the Chinese Institute of engineers. Series S.-2015. - V. 36 (1). - Pp. 85-90.

13. Kim H., Jang J., Shin S., Park Y., Kim S., Kim H. R., Hyun B., Kim J. evaluation of energy saving using ultrathin thermal insulation in railway electrification substation // proceedings of the Korean Institute of electrical engineers.-2015. – V. 64 (1). - Pp. 171-175.
14. Qi Y., Yin X., Zhang J. transparent and heat-insulating plasticized polyvinyl chloride (PVC) thin film with solar spectral-selective property // materials of solar energy and solar cells. - 2016. - St. 151. - P. 30-35.
15. Patankar S. N., KRANOV Yu. a. hollow glass microspherical composites of HDPE for ensuring low energy stability // Materials science and engineering, 2010, V. 527, Pp. 1361-1366.
16. Wang H., Fang H. J., Lan Q. D., He S., Jiang C. influence of a thin film of a hollow glass microsphere on the thermal insulation characteristics of the building envelope // Shanghai Jiaotong Daxue Xuebao / Journal of Shanghai Jiaotong University. – 2014. - V. 48 (9). - Pp. 1341-1345.
17. Liao Y., Wua X., Liua H., Chen Y. thermal conductivity of powdered silica hollow spheres // Thermochemica Acta. – 2011. - V. 526. - Pp. 178-184.
18. Fiedler T., Leffler R., Berntaler T., Winkler R., Belova I. V., March G. E., Ehsnerk A. numerical analysis of thermal conductivity of random hollow spherical structures // letters of materials. - 2009. - V. 63. - no. 13-14. - Pp. 1125-1127.
19. Ryzhenkov A.V., Lapin E. E., Loginova N. A., Sitdikov D. R., Grigoriev S. V. Evaluation of the thermal efficiency of high-temperature thermal insulation structures based on cellular plastic // teplotekhnika. - 2016. - St. 63 (6). - Pp. 445-448.
20. Belyaeva E. V., Loginova N. A., Lapin E. E., Pogorelov S. I., Ryzhenkov A.V. Research of heat capacity of synthetic foam based on silicone and organic matrix // oil industry. - 2016. - no. 11. - Pp. 116-119.
21. Osipchik V. S., Kostromina N. V., Olikhova Yu. V., Ivashkina V. N., Belyaeva E. V., Loginova N. A., Ryzhenkov A.V., Lapin E. E. investigation of the influence of modification of glass microspheres on the properties of synthetic Foams based on oligomethylsiloxane // international polymer Science and technology. – 2016. - V. 43 (7). - Pp. 133-137.
22. Levitin S. V., Belyaeva E. V., Loginova N. A., Lapin E. E., Ryzhenkov A.V. Research of component ratios for manufacturing flexible polymer insulation with optimal thermal and mechanical characteristics // oil industry. - 2015. - № 9. - Pp. 130-133.
23. Ryzhenkov A.V., Loginova N. A., Belyaeva E. V., Lapin Yu. y., Prishchepov A. F. review of binders in syntactic foams for thermal insulation structures of

electric power facilities // modern applied science-2015. - V. 9. - no. 4. - Pp. 96-105.

24. Varavka V. N., Kudryakov O. V., Ryzhenkov A.V., Kachalin G. V., Zilova O. S. Application of nanocomposite coatings for protection of power equipment from drop shock erosion // teplotekhnika. - 2014. - V. 61. - no. 11. - Pp. 797-803.

25. Kudryakov O. V., Varavka V. N. complex tests for indentation of metal-ceramic nanocomposite