

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки Теплоэнергетика и теплотехника

Отделение школы (НОЦ) НОЦ И.Н. Бутакова

Профиль Промышленная теплоэнергетика

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Энтальпийный метод решения задач плавления или солидификации

УДК 536.421.1:004.42

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б8Б	Сыева Саяна Ойгоровна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова	Ни А.Э.	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор ОСГН	М.А. Гасанов	Д.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	И. Л. Мезенцева			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель Отделения/НОЦ	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	А.М. Антонова	к.т.н		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(ых) языке(ах)
УК-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
УК-9	Способен проявлять предприимчивость в профессиональной деятельности, в т.ч. в рамках разработки коммерчески перспективного продукта на основе научно-технической идеи
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен осуществлять поиск, обработку и анализ информации из различных источников и представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий
ОПК(У)-2	Способен применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования в теоретических и экспериментальных исследованиях при решении профессиональных задач
ОПК(У)-3	Способен вести инженерную деятельность, разрабатывать, оформлять и использовать техническую проектную и эксплуатационную документацию в соответствии с требованиями действующих нормативных документов
ОПК(У)-4	Способен учитывать свойства конструкционных материалов в теплотехнических расчетах с учетом динамических и тепловых нагрузок

Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен применять знания теоретических основ теплотехники и гидрогазодинамики при решении научных и практических профессиональных задач
ПК(У)-2	Способен анализировать эффективность современных технологий получения, преобразования, транспорта и использования энергии в теплоэнергетических установках и нетрадиционных источниках энергии
ПК(У)-3	Способен разрабатывать природоохранные, энерго- и ресурсосберегающие мероприятия на теплотехническом оборудовании
ПК(У)-4	Способен осуществлять анализ режимов работы с формулированием предложений по повышению эффективности деятельности и модернизации предприятий с учетом современных инновационных подходов
ПК(У)-5	Способен управлять технологическим оборудованием, контролировать параметры процессов и показатели получаемой продукции, показатели энерго- и ресурсоэффективности производственного цикла
ПК(У)-6	Способен осуществлять проектирование и эксплуатацию теплотехнического, тепломеханического, теплообменного основного и вспомогательного оборудования, а также технологических установок, работающих под избыточным давлением
ОПК(У)-5	Способен проводить измерения электрических и неэлектрических величин на объектах теплоэнергетики и теплотехники, использовать электронные приборы и устройства в производственной деятельности, осуществлять метрологическое обеспечение

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

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Отделение школы (НОЦ) НОЦ И.Н. Бутакова

Профиль Промышленная теплоэнергетика

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5Б8Б	Сыева Саяна Ойгоровна

Тема работы:

Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	2 июня 2022 года
--	------------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><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, изделю 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></p>	<p>Объект исследования: процессы плавления и солидификации. Предмет исследования: энтальпийный метод.</p>
--	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</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>	<ul style="list-style-type: none"> – постановка цели и задач исследования; – обзор литературы; – постановка задачи; – верификация; – численное моделирование и анализ результатов; – заключение.
--	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность, и ресурсосбережение	Гасанов М.А., профессор отделения социально-гуманитарных наук
Социальная ответственность	Мезенцева И.Л., старший преподаватель отделения общетехнических дисциплин

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	1 декабря 2021 года
---	---------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н.Бутакова ИШЭ	Ни Александр Эдуардович	к.ф.-м.н.		01.12.2021

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б8Б	Сыева Саяна Ойгоровна		01.12.2021

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

Студенту:

Группа	ФИО
5Б8Б	Сыева Саяна Ойгоровна

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	И.Н. Бутакова
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.03.01 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	Оклад руководителя – 45000 руб. Оклад инженера – 15000 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Премимальный коэффициент руководителя 30%; Премимальный коэффициент инженера 30%; Доплаты и надбавки руководителя 40%; Доплаты и надбавки инженера 30%; Дополнительной заработной платы 15%; Накладные расходы 16%; Районный коэффициент 1,3%.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды 30,2 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Определение потенциального потребителя результатов исследования, SWOT-анализ разработанной стратегии
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Определение структуры работы. Расчет трудоемкости выполнения работ. Подсчет бюджета исследования
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Рассчитать показатели финансовой эффективности, ресурсоэффективности и эффективности исполнения

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. Альтернативы проведения НИ
4. График проведения и бюджет НИ
5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.03.2022
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор ОСГН	Гасанов М.А.	Д.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б8Б	Сыева Саяна Ойгоровна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа		ФИО	
5Б8Б		Сыева Саяна Ойгоровна	
Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	НОЦ И.Н. Бутакова
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Теплоэнергетика и теплотехника 13.03.01

Тема ВКР:

Энтальпийный метод решения задач плавления или солидификации	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<p>Введение</p> <ul style="list-style-type: none"> – Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения. – Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации 	<p>Объект исследования: энтальпийный метод Область применения: энергетика Рабочая зона: <u>офис</u> Размеры помещения: площадь 15 м² Количество и наименование оборудования рабочей зоны: компьютер, программа Matlab. Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне: моделирование процессов плавления и солидификации.</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при разработке проектного решения</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<ul style="list-style-type: none"> • Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 25.02.2022) • ТК РФ Статья 351.6. Особенности регулирования труда работников в сфере электроэнергетики, сфере теплоснабжения, в области промышленной безопасности, области безопасности гидротехнических сооружений; • Федеральный закон от 28 декабря 2013 г. N 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда». • ГОСТ 12.2.032-78 Рабочее место при выполнении работ сидя

<p>2. Производственная безопасность при разработке проектного решения:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов 	<p>Вредные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> • нервно-психические перегрузки, монотонность трудового процесса • статические перегрузки, связанные с рабочей позой • отсутствие или недостатки необходимого искусственного освещения; • длительное сосредоточенное наблюдение • повышенный уровень электромагнитных излучений • перенапряжение зрительного анализатора <p>Опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> • факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий; <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> • прохождение техники безопасности 	
<p>3. Экологическая безопасность при разработке проектного решения</p>	<p>Воздействие на селитебную зону: процессе моделирования затрачивается достаточно большое количество электроэнергии</p> <p>Воздействие на литосферу: процесс утилизации отработавших чипов</p> <p>Воздействие на гидросферу: воздействий не обнаружено</p> <p>Воздействие на атмосферу: выделение вредных веществ, при эксплуатации чипа</p>	
<p>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного решения</p>	<p>Возможные ЧС: пожар, взрыв, землетрясение</p> <p>Наиболее типичная ЧС: пожар</p>	
<p>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</p>		<p>01.03.2020</p>

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Мезенцева Ирина Леонидовна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б8Б	Сыева Саяна Ойгоровна		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 74 страницы, 13 рисунков, 21 таблица, 41 источник.

Ключевые слова: моделирование, плавление, солидификация, энтальпийный метод, Matlab.

Объектом исследования являются процессы плавления и солидификации.

Целью работы является создание модели и работоспособной компьютерной программы для описания процесса плавления и солидификации энтальпийным методом.

В процессе исследования создавалась работоспособная программа для моделирования процессов плавления и солидификации и исследование влияния безразмерных критериев на расположение фронта плавления.

В результате экспериментального исследования была выявлена зависимость расположения фронта плавления от некоторых безразмерных критериев.

Область применения: энергетика, микроэлектроника, строительная теплофизика.

Значимость работы состоит в том, что полученные результаты компьютерной модели могут использоваться как для разработки новых моделей, так и для применения на практике в таких областях как микроэлектроника и строительная теплофизика.

Оглавление	
Введение.....	12
1.Современные исследования в области моделирование процессов плавления и солидификации.....	13
1.1. Основные подходы к отслеживанию межфазных границ	13
1.2 Системы охлаждения на основе материалов с фазовыми превращениями	18
2. Постановка задачи плавления/солидификации с естественной конвекцией	22
2.1. Геометрическая и физическая модель	22
2.2. Математическая модель	23
2.3. Алгоритм решения	24
2.4. Верификация.....	25
2.4.1 Двумерная задача теплопроводности для однородного тела.....	25
3.Численное моделирование	28
3.1 Влияние фактора нестационарности.....	29
3.2 Влияние числа Фурье	30
3.3 Влияние числа Стефана.....	31
3.4 Влияние числа Био.....	32
Вывод по разделу	33
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение... 34	
Введение.....	34
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования	34
4.2 Анализ конкурентных технических решений	35
4.3 SWOT-анализ.....	36
4.4 Планирование работ по научно-техническому исследованию	40
4.5 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)	46
4.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования ..	54
Выводы по разделу.....	56
5 Социальная ответственность.....	57
Введение.....	57
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	57

5.2 Производственная безопасность	60
5.3 Экологическая безопасность.....	66
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	67
Выводы по разделу социальная ответственность.....	69
Заключение	70
Список использованных источников	71

Введение

Математическое и компьютерное моделирование является мощным инструментом современных теоретических исследований и обладает массой преимуществ. Вычислительный эксперимент на основе математических моделей позволяет получить с минимальными затратами и с высокой степенью адекватности качественную и количественную информацию об исследуемом объекте. В полной мере это относится к теоретической и инженерной теплофизике, где задачи теплопроводности с фазовыми переходами являются одними из наиболее типичных. В настоящее время ведутся исследования моделирования процессов с фазовыми превращениями, поскольку полученные результаты компьютерной модели могут использоваться как для разработки новых моделей, так и для применения на практике в таких областях как микроэлектроника и строительная теплофизика.

Целью работы является создание модели и работоспособной компьютерной программы для описания процесса плавления и солидификации энтальпийным методом.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- 1) Изучение литературы в области моделирования процессов плавления и солидификации;
- 2) Разработка программы в среде Matlab и проверка ее работоспособности;
- 3) Проведение численных исследований процессов плавления/солидификации

Объект исследования: процессы плавления и солидификации.

Предмет исследования: энтальпийный метод.

1.Современные исследования в области моделирование процессов плавления и солидификации

1.1. Основные подходы к отслеживанию межфазных границ

Для решения задач с фазовыми переходами необходимо знать основные подходы к отслеживанию межфазных границ. Граничные условия практически необходимы для постановки задачи и в то же время имеют первостепенное значение в вычислительной гидродинамике. Это связано с тем, что применимость численных методов и результирующее качество вычислений могут критически определяться тем, как они обрабатываются численно. Сегодня потребность в вычислительном анализе систем с подвижной границей возросла и усложнилась. На этом фоне технологии моделирования частиц, одной из важных особенностей которых является высокая адаптируемость при моделировании границ с резким движением, привлекают все большее внимание как новая многообещающая вычислительная парадигма в различных областях науки и техники.

Многие важные задачи, такие как поток, вызванный движущимися объектами, поток со свободной поверхностью, поток с участием пузырьков воздуха, поток, сопровождающий фазовый переход, и взаимодействие жидкости с конструкцией, являются задачами с движущимися границами. При работе с такими границами с движением или деформацией традиционные методы сеток, такие как метод конечных разностей, метод конечных элементов и метод конечных объемов, обычно сталкиваются с трудностями при точном расчете геометрической формы границы.

На данный момент, известно два подхода к отслеживанию межфазной границы: при помощи граничного условия и энтальпийного метода.

Отслеживание фронта плавления при помощи граничных условий в задаче Стефана используется в работе Джойокамало [1]. Описывается моделирование процесса плавления льда, когда ледяная глыба тает, жидкая область увеличивается, а твердая область уменьшается, что приводит к

смещению положения границы раздела с течением времени. Использовались граничные и начальные условия первого и второго родов.

Аналитическое решение проблемы изменения фазы, известное как задача Стефана или движущейся границы, в материалах с фазовыми превращениями подтверждены граничными условиями, которые являются переменными во времени, в стабильном периодическом режиме. Двухфазная проблема Стефана решается с учетом периодических граничных условий температуры или теплового потока или даже смешанных условий. Это явление присутствует в кондиционированных зданиях, стены, в которых используются слои материалов с фазовыми превращениями, чтобы уменьшить тепловые нагрузки и требования к энергии, которые будут компенсированы заводом. Используемый метод разрешения - метод, в котором фазоры позволяют преобразовать дифференциальные уравнения в части, описывая проводимость в твердой и жидкой фазе, в обычные дифференциальные уравнения; Кроме того, фазоры допускают преобразование уравнения теплового баланса на разделах двухфазной границы в алгебраические уравнения. Затем проблема с движущейся границей уменьшается до системы алгебраических уравнений, решение из которого обеспечивает положение во время раздела бифазного и теплового поля слоя. Полученное решение обеспечивает различные термодинамические конфигурации, которые может принять слой, и заставляет положение раздела двухфазной границы, а тепловое поле зависит от числа Фурье и от числа Стефана, рассчитанного в твердой фазе и в жидкой фазе. В случае двух граничных условий представлено одним синусоидальным колебанием, общий анализ, рассматриваемый в различных термодинамических конфигурациях, полученных в результате изменения числа Фурье и Стефана, показывает процедуру расчета устойчивого и колеблющегося компонента положения VI -Фазовый интерфейс, температурного поля и поля теплового потока. Кроме того, рассмотрен конкретный случай слоя материала с фазовым превращением с колеблющимся граничным условием температуры на одной поверхности и постоянной

температурой на другой. Аналитическая процедура также использовалась для анализа, посвященного тепловому поведению соли, подверженной независимым мульти гармоничным граничным условиям. Эта соль является одной из наиболее изученных, имеет высокую температуру плавления и подходит для использования в стенах зданий [2].

Методы частиц, включая полунеявный метод движущихся частиц, могут обрабатывать границы с большой деформацией, например, в задачах обтекания со свободной поверхностью. Однако числовая обработка граничного условия, как правило, довольно громоздка из-за проблемы дефицита частиц. Сегодня численные алгоритмы для обработки границ были разработаны в ряде исследований, но все еще являются предметом активных исследований. В этой статье [3] представлены численные методы для трех типов границ: твердая стенка, свободная поверхность и граница входа/выхода. Для границы твердой стенки подробно объясняются метод частиц стены, метод зеркальных частиц, модель стены многоугольника и метод граничного интеграла. Также обсуждаются преимущества и недостатки каждого метода. Для границы со свободной поверхностью описано несколько подходов к обнаружению частиц на свободной поверхности и расчету давления с повышенной стабильностью и точностью. Для входной/выходной границы предусмотрено представление притока и оттока частиц.

В этой статье [4] предлагается эффективный унифицированный метод конечных разностей для наложения смешанных граничных условий Дирихле, Неймана и Робина на нерегулярные области, основанный на уже имеющейся работе [5]. Метод набора уровней применяется для описания границы раздела произвольной формы, а метод прозрачной жидкости используется для устранения сложных неоднородностей на границе раздела. Суть этого метода заключается в обеспечении требуемых фантомных значений при ограничении смешанных граничных условий, что осуществляется дробно-шаговым способом. В частности, нормальная производная вычисляется в рассматриваемой подобласти с помощью линейной полиномиальной

реконструкции, затем нормальная производная и фантомное значение последовательно экстраполируются на другую подобласть с использованием подхода линейного дифференциального уравнения в частных производных. Метод дает решения второго порядка точности с градиентами первого порядка, и его легко реализовать в многомерных конфигурациях. Таким образом, метод представляет собой многообещающий инструмент для наложения смешанных граничных условий, который будет применяться к практическим задачам в будущей работе.

Второй метод отслеживания межфазных границ – энтальпийный метод. Энтальпийный метод — простой и эффективный метод решения задач подвижной границы, связанных с плавлением и затвердеванием. Численные методы, используемые для решения уравнений, обычно представляют собой явные и неявные методы. Около 200 лет назад Лавуазье и Лаплас заметили, что энергия агрегатного превращения не зависит от давления, поскольку линия переходов из жидкого агрегатного состояния и обратно, для большинства материалов, удалена от тройной точки. Таким образом, они предложили ледяной калориметр необходимый для измерения количества теплоты, выделившейся или поглощенной в каком-либо физическом, химическом или биологическом процессе.

Нет достоверной информации о том, кто первым предложил энтальпийную формулировку задач Стефана. В работе [6] автор предлагает следующий прием при решении методом элементарных балансов одномерной задачи с подвижной границей раздела фаз: начиная с момента времени, в который в данном элементарном объеме достигается температура равная температуре фазового перехода T_f , необходимо суммировать количества теплоты, поступающее в объем в каждый последующий интервал времени Δt , и сопоставлять суммарное количество с теплотой, потребленной для фазового перехода в данном объеме:

$$Q_{fas} = \varphi\rho\Delta V = \Phi\Delta V, \quad (1.1)$$

где φ - теплота фазового перехода единицы массы; Φ – теплота фазового перехода единицы объема; V - объем.

Весь период, пока поступившее тепло меньше теплоты фазового перехода, в объеме поддерживается постоянная температура T_f . Разумеется, чтобы достаточно точно отследить начало и конец фазового перехода, интервал времени $\Delta\tau$ должен быть достаточно малым. Разумеется также, что точность определения координаты расположения границы раздела фаз равна половине пространственного интервала Δx . Алгоритм, построенный на таком физически очевидном представлении о процессе фазового перехода, уже, по существу, является энтальпийным методом расчета, хотя в работах Дюзинбера [6] понятие «энтальпия» (теплосодержание) не упоминается.

Возможно теоретическое обоснование энтальпийного метода принадлежит, автору из данной публикации [7]. Именно здесь впервые введено понятие обобщенной задачи Стефана и доказано существование и единственность решения данного класса задач. Также доказано, что классическая задача Стефана является частным случаем обобщенной.

По Каменомостской [7], дифференциальное уравнение теплопроводности в энтальпийной формулировке записывается следующим образом:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \text{div}(\text{grad}(u)), \quad (1.2)$$

$$\text{где } u(T) = \int_{T_f}^T \lambda(t) dt; \quad (1.3)$$

$$h(T) = \int_{T_f}^T c(t)\rho(t) dt; \quad \text{при } T \leq T_f; \quad (1.4)$$

$$h(T) = \int_{T_f}^T \Phi + c(t)\rho(t) dt; \quad \text{при } T \geq T_f; \quad (1.5)$$

Из уравнений (1.4) и (1.5) следует, что при температуре T_f функция $h(T)$ имеет разрыв, однако в работе [6] указано, что функция $h(T)$ - не что иное,

как теплосодержание, т.е. по физическому смыслу является монотонной функцией, зависящей от величины теплового потока к элементам с температурой $T = T_f$ в данный момент времени.

1.2 Системы охлаждения на основе материалов с фазовыми превращениями

Материал с фазовым переходом представляет собой вещество, которое отдает или поглощает энергию, достаточную при фазовом переходе, чтобы обеспечить полезное тепло или охлаждение. Обычно переход происходит от одного из первых двух основных состояний вещества - твердого и жидкого - к другому. Фазовый переход также может происходить между неклассическими состояниями вещества, такими как соответствие кристаллов, когда материал переходит от соответствия одной кристаллической структуре к соответствию другой, которая может быть более или менее энергетическим состоянием.

Энергия, выделяемая или поглощаемая при фазовом переходе от твердого тела к жидкости, или наоборот, теплота плавления обычно намного выше, чем явная теплота. Лед, например, тает при 333,55 Дж/г, но тогда вода поднимется еще на один градус при добавлении всего 4,18 Дж/г. Следовательно, вода или лед - очень полезный материал с фазовым переходом, который использовался для охлаждения зданий летом.

Путем плавления и затвердевания при температуре фазового перехода материал способен накапливать и выделять большое количество энергии по сравнению с физическим накоплением тепла. Тепло поглощается или выделяется, когда материал превращается из твердого в жидкое и наоборот, или когда изменяется внутренняя структура материала.

Системы охлаждения на основе материалов с фазовыми превращениями применяются, как правило, для охлаждения зданий, компьютеров и холодильников. Системы фазового превращения имеют большую мощность и могут обеспечивать очень низкие отрицательные температуры.

Задачи нестационарной теплопроводности с фазовыми переходами, связанные с промерзанием грунта, решаются энтальпийными методами. Представлена история развития метода для обобщенной задачи Стефана. В данной статье предложен алгоритм расчетов процессов затвердевания-плавления во влажных грунтах, основанный на явной конечно-разностной аппроксимации уравнения энтальпии, являющейся функцией температуры и обледенения. Графическое выражение решений для различных зон фазового перехода представлены крупнодисперсные и мелкодисперсные грунты. На основе предложенного алгоритма была разработана серия программ на разных языках программирования, а также версия критериальной формы решения, и путем обработки большого количества численных экспериментов, методом подобия был создан "обобщенный метод расчетов устройства сезонного охлаждения" [8].

В данной публикации [9] моделируется трехмерная задача плавления льда при помощи энтальпийного метода. Процессы фазового перехода моделируются с учетом возможной неоднородности теплофизических параметров льда из-за процесса промерзания, динамики температуры окружающего воздуха и воды, солнечной активности в течение года. Этот подход можно использовать для оптимизации формы и размера ледяного острова, для исследования осуществимости введения теплоизоляционных слоев, необходимо варьировать технологию замораживания с учетом климатических условий.

Данная публикация [10] посвящена созданию энергоэффективных систем холодоснабжения и теплоснабжения с использованием тепловой энергии аккумуляторов. Аккумуляирование тепловой энергии повышает эффективность теплоэнергетических систем, включая охлаждение и кондиционирования, снижает пиковую потребляемую мощность и мощность тепловых установок при переменных нагрузках. Показано, что вещества с фазовым переходом (ФП) широко используются для аккумуляирования

тепловой энергии. Сформулированы требования к материалам с фазовыми превращениями применительно к аккумуляторам тепловой энергии. Дан обзор рекомендуемых к применению материалов, к которым относятся органические соединения (парафины, жирные кислоты), гидраты соли, эвтектики (могут включать в свой состав органические и неорганические соединения). Для каждой группы веществ выявлены свои плюсы и минусы. Представлена информация о свойствах некоторых материалов применительно к системам кондиционирования. Показано, что материалы, имеющие промышленное применение, скрыты под товарными знаками. Отмечается, что системы накопления энергии российского производства требуют проведения комплекса фундаментальных и прикладных исследований. Представлены примеры применения аккумуляторов тепловой энергии с помощью материалов с фазовыми превращениями в системах кондиционирования воздуха. Конструкции аккумуляторов тепловой энергии описаны, отмечены их преимущества и недостатки. Проведен анализ методов расчета систем с аккумуляторами тепловой энергии, в том числе решения задачи Стефана о нестационарном теплообмене при фазовых переходах в связи с накоплением тепловой энергии. Сделан вывод о преимуществах численного метода решения этой задачи. Сформулированы направления исследований реализация, которых позволит развивать российские системы тепло- и холодоснабжения с накопителями тепловой энергии.

Метод фазового поля широко используется для изучения процессов быстрого затвердевания, таких как аддитивное производство. Чтобы снизить вычислительные затраты, в исходный набор уравнений фазового поля для затвердевания сплава было внесено множество упрощений и модификаций. Однако как эти упрощения повлияют на результаты моделирования изучено недостаточно. В этой работе разработана модель фазового поля, включающая как комбинированная термическая диффузия растворенных веществ и улавливание растворенных веществ для быстрого затвердевания

разбавленных бинарных сплавов. Данная статья описывает влияние упрощений кинетики интерфейса, улавливания растворенных веществ и термодиффузии на результаты моделирования. Включая и выключая эти три эффекта по отдельности, исследуется как влияют температура, концентрация растворенного вещества и межфазная скорость. Исследование показывает, что кинетику поверхности раздела и термодиффузию нельзя игнорировать для количественного моделирования быстрого затвердевания. В конце концов, использовано быстрое затвердевание ленты, формованной из расплава, в качестве примера, чтобы показать, что модель фазового поля со всеми тремя рассматриваемыми аспектами способна уловить сложное взаимодействие между температурами, концентрациями растворенного вещества и межфазной скорости и прогнозирование результирующих структур затвердевания [11].

В этой статье представлена улучшенная модель параметров нескольких порядков для многокомпонентной модели затвердевания поликристаллов. Введена интерполяционная функция в динамическое уравнение фазового поля, чтобы получить контролируемую энергию зерен на границах при большом переохлаждении. Функция интерполяции также используется в коэффициенте кинетики, чтобы лучше контролировать миграцию границ зерен. Зависящие от температуры параметры фазового поля и шумовые составляющие последовательно связаны с динамикой двойной системы таким образом, что позволяет проводить количественное моделирование в пределах тонкой границы раздела. Модель применяется к многофазному затвердеванию в сплаве Al-Cu, где для моделирования свободной энергии фаз Al-Cu используется метод параболической подгонки, а двухфазное зародышеобразование демонстрируется при направленном затвердевании [12].

2. Постановка задачи плавления/солидификации с естественной конвекцией

2.1. Геометрическая и физическая модель

В работе рассматривается процесс охлаждения за счет фазового перехода. В начальный момент времени на поверхность пластины воздействует энергия от охлаждаемого объекта, в результате этого пластина начинает прогреваться. При достижении на поверхности пластины температуры, равной температуре фазового перехода, инициируется процесс плавления материала, поглощая теплоту от охлаждаемого объекта, далее теплота отводится в атмосферу, и пластина охлаждается.

Рассматривается пластина длиной L и высотой H , на одной из поверхностей задана температура T_1 . Теплофизические свойства материала постоянны. На рис. 2.1 представлена геометрическая модель пластины с размерами H и L .

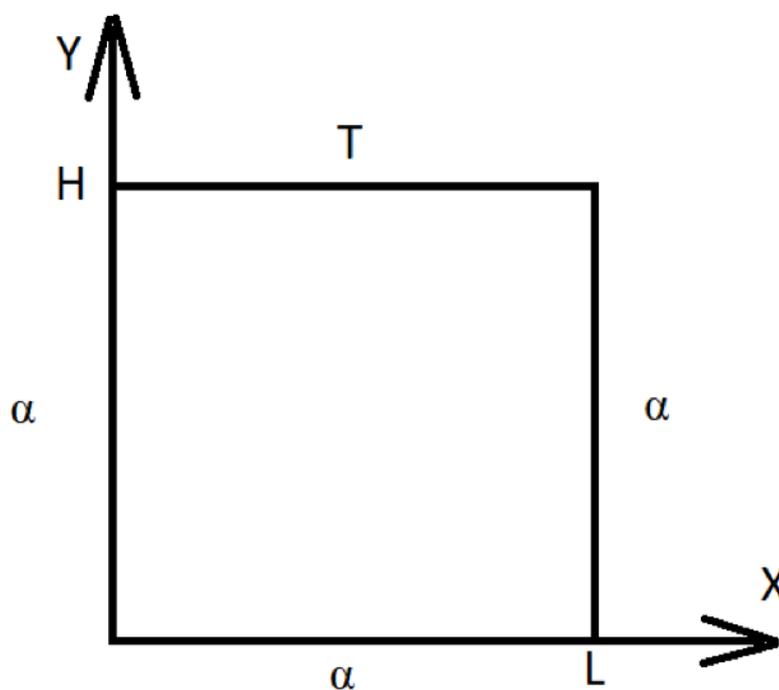


Рисунок 2.1 – Геометрическая модель пластины

2.2. Математическая модель

Математическая модель для выше приведенной пластины состоит из уравнения теплопроводности с учетом фазового перехода и будет иметь вид:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \rho Q \frac{\partial f_l}{\partial t}, \quad (2.1)$$

где ρ - плотность, кг/м³,

c - удельная теплоемкость, кДж/кг·°С,

λ - коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С,

Q – скрытая теплота плавления, кДж/кг,

f_l – доля жидкой фазы.

Доля жидкой фазы рассчитывается:

$$f_l = \begin{cases} 0, h_d \geq h; \\ \frac{h - h_d}{h_l - h_d}, h_d < h < h_l; \\ 1, h_l \leq h; \end{cases} \quad (2.2)$$

где $h = c(T_z - T_x) + Qf_l$ - энтальпия, кДж/кг, T_z, T_x - температуры горячего и холодного источников, соответственно, индексы l и d соответствуют жидкой и твердой фазе.

При анализе процесса теплопереноса в пластине необходимо задать начальную температуру. Тогда краевые условия запишутся следующим образом:

$$t = 0: T = T_0, 0 < x < L, 0 < y < H; \quad (2.3)$$

$$x = 0: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T - T_e), t > 0; \quad (2.4)$$

$$x = L: -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T - T_e), t > 0; \quad (2.5)$$

$$y = 0: \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha(T - T_e), t > 0; \quad (2.6)$$

$$y = H : T = T_1, t > 0; \quad (2.7)$$

где T_e - температура окружающей среды, °С.

2.3. Алгоритм решения

Уравнение (2.1) с соответствующими начальными и граничными условиями решено методом конечных разностей. Метод конечных разностей — приближенный метод решения дифференциальных уравнений в частных производных. Данный метод применим для решения многих задач. К ним относятся линейные и нелинейные, не зависящие от времени и зависящие от времени задачи. Этот метод можно применять к задачам с различной формой границ, различными видами граничных условий и для области, содержащей несколько различных материалов. Несмотря на то, что этот метод был известен таким ученым, как Гаусс и Больцман, он не применялся широко для решения инженерных задач до 1940-х годов. Математическая основа метода уже была известна Ричардсону в 1910 году [13], и было опубликовано множество математических книг, таких как [14 и 15], в которых обсуждался метод конечных разностей. Конкретная ссылка на рассмотрение задач электрического и магнитного поля сделана в [16]. Применение FDM не представляет сложности, так как требует лишь простой арифметики при выводе уравнений дискретизации и написании соответствующих программ. В 1950–1970-х годах FDM был наиболее важным численным методом, использовавшимся для решения практических задач [17-19]. С развитием высокоскоростных компьютеров, обладающих большой емкостью памяти, появилось множество численных методов решения уравнений в частных производных. Однако из-за простоты применения метода конечных разностей он по-прежнему является ценным средством решения этих задач ([20–23]). Аппроксимация уравнений в частных производных проведена при помощи явной схемы.

Рассмотрим решение уравнения теплопроводности. Для аппроксимации дифференциального уравнения (2.1) разностным методом введем пространственно-временную сетку с координатами:

$$x_i = (i - 1) \cdot h_x, y_j = (j - 1) \cdot h_y, t_n = n \cdot \tau, \quad (2.8)$$

где h_x, h_y - шаги сетки по координатам x, y соответственно,

τ - шаг по времени.

Пространственный слой, на котором рассматривается неизвестное поле температуры:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_{i+1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i-1,j}^n}{h_x^2} + \frac{T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n}{h_y^2} \quad (2.9)$$

Доля жидкой фазы:

$$\frac{\partial f_l}{\partial t} = \frac{f_{l,i,j}^{n+1} - f_{l,i,j}^n}{\tau} \quad (2.10)$$

В результате аппроксимаций частных производных соответствующими конечными разностями получаем следующее соотношение для определения поля температуры (2.12):

$$\rho \cdot c \cdot \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{\tau} = \lambda \left(\frac{T_{i+1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i-1,j}^n}{h_x^2} + \frac{T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n}{h_y^2} \right) + \frac{Q}{c} \frac{f_{l,i,j}^{n+1} - f_{l,i,j}^n}{\tau} \Bigg|_{\substack{i=2,\dots,N_x-1, \\ j=2,\dots,N_y-1}} \quad (2.11)$$

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \frac{\lambda \cdot \tau}{\rho \cdot c} \left(\frac{T_{i+1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i-1,j}^n}{h_x^2} + \frac{T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n}{h_y^2} \right) + \frac{Q}{c} \frac{f_{l,i,j}^{n+1} - f_{l,i,j}^n}{\tau} \Bigg|_{\substack{i=2,\dots,N_x-1, \\ j=2,\dots,N_y-1}} \quad (2.12)$$

2.4. Верификация

Для верификации математической модели была решена типовая задача теплопроводности.

2.4.1 Двумерная задача теплопроводности для однородного тела

Решена двумерная задача теплопроводности для однородного тела явным методом конечных разностей в среде программирования Matlab. В

задаче рассматривается медная пластина с размерами $L=H=0,5$ м. Задана начальная температура области решения $T_0 = 5^\circ\text{C}$ и температуры на вертикальных границах $T_h = 80^\circ\text{C}$ и $T_c = 30^\circ\text{C}$. Горизонтальные границы адиабатические.

Геометрическая постановка задачи приведена на рисунке 2.2.

Математическая постановка задачи будет иметь вид:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \Big|_{\substack{0 < x < L; \\ 0 < y < H.}} \quad (2.13)$$

Начальные и граничные условия имеют вид:

$$t = 0: T = T_0, 0 < x < L, 0 < y < H; \quad (2.14)$$

$$x = 0: T = T_h, t > 0; \quad (2.15)$$

$$x = L: T = T_c, t > 0; \quad (2.16)$$

$$y = 0: \frac{\partial T}{\partial y} = 0, t > 0; \quad (2.17)$$

$$y = H: \frac{\partial T}{\partial y} = 0, t > 0; \quad (2.18)$$

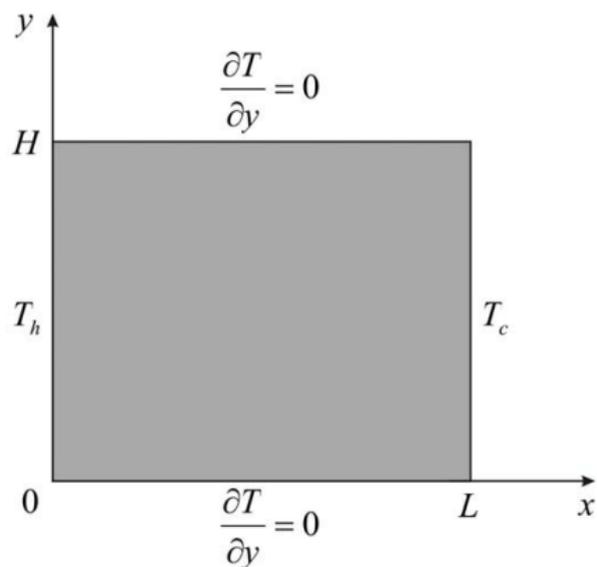


Рисунок 2.2 – Область решения

Распределение температур, полученное в среде программирования Matlab приведено на рисунке 2.3.

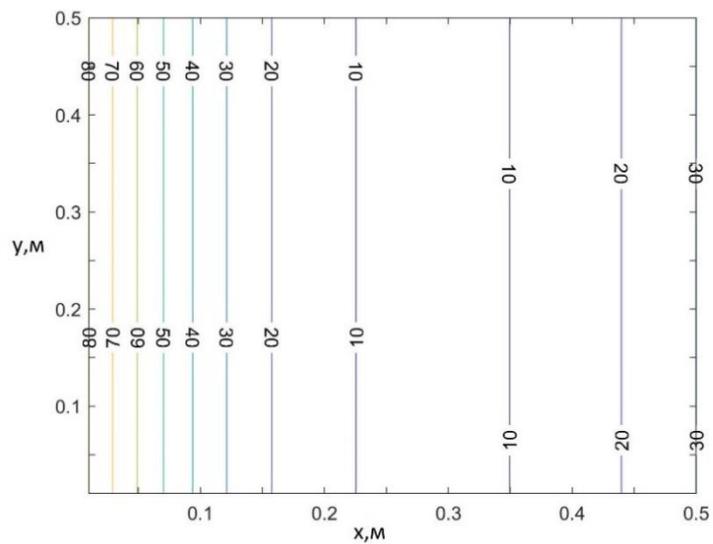


Рисунок 2.3 – Изотермы ($^{\circ}\text{C}$) полученные при решении в Matlab

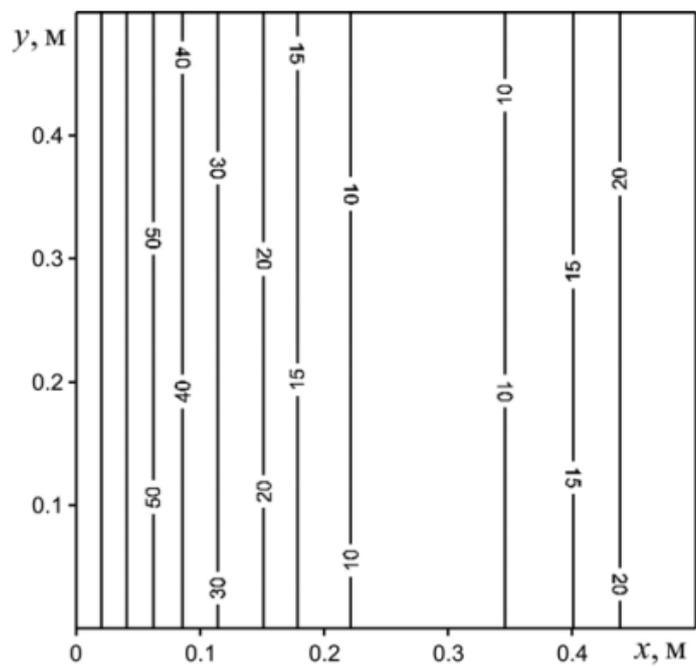


Рисунок 2.4 - – Изотермы ($^{\circ}\text{C}$) в пластине при $t = 60 \text{ с}$, полученные в [24]

3. Численное моделирование

Для удобства анализа результатов численного моделирования определяющее уравнение приведено к безразмерному виду. В ходе процедуры обезразмеривания, получились следующие безразмерные критерии (3.1), (3.2), (3.3):

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{l^2} \quad (3.1)$$

где Fo - число Фурье,

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} - \text{коэффициент теплопроводности, } \frac{\text{м}^2}{\text{с}},$$

l - характерный размер, м.

$$Ste = \frac{Q}{c(T_h - T_f)}, \quad (3.2)$$

где Ste - число Стефана,

c - удельная теплоемкость, кДж/кг · °С,

Q - скрытая теплота плавления, кДж/кг,

T_f - температура фазового перехода, °С .

$$Bi = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}, \quad (3.3)$$

где Bi - Число Био.

$$\alpha - \text{коэффициент теплообмена, } \frac{\text{Вт} \cdot \text{м}^2}{\text{°С}}$$

При моделировании в начальный момент времени материал находится при температуре равной температуре фазового перехода. Соответственно, будет формироваться фронт плавления.

3.1 Влияние фактора нестационарности

Рассмотрено влияние фактора нестационарности на температурное поле в пластине при постоянных числах Стефана $Ste=1$ и Фурье $Fo=0,01$. Изотермы, полученные при решении изображены на рисунке 3.1.

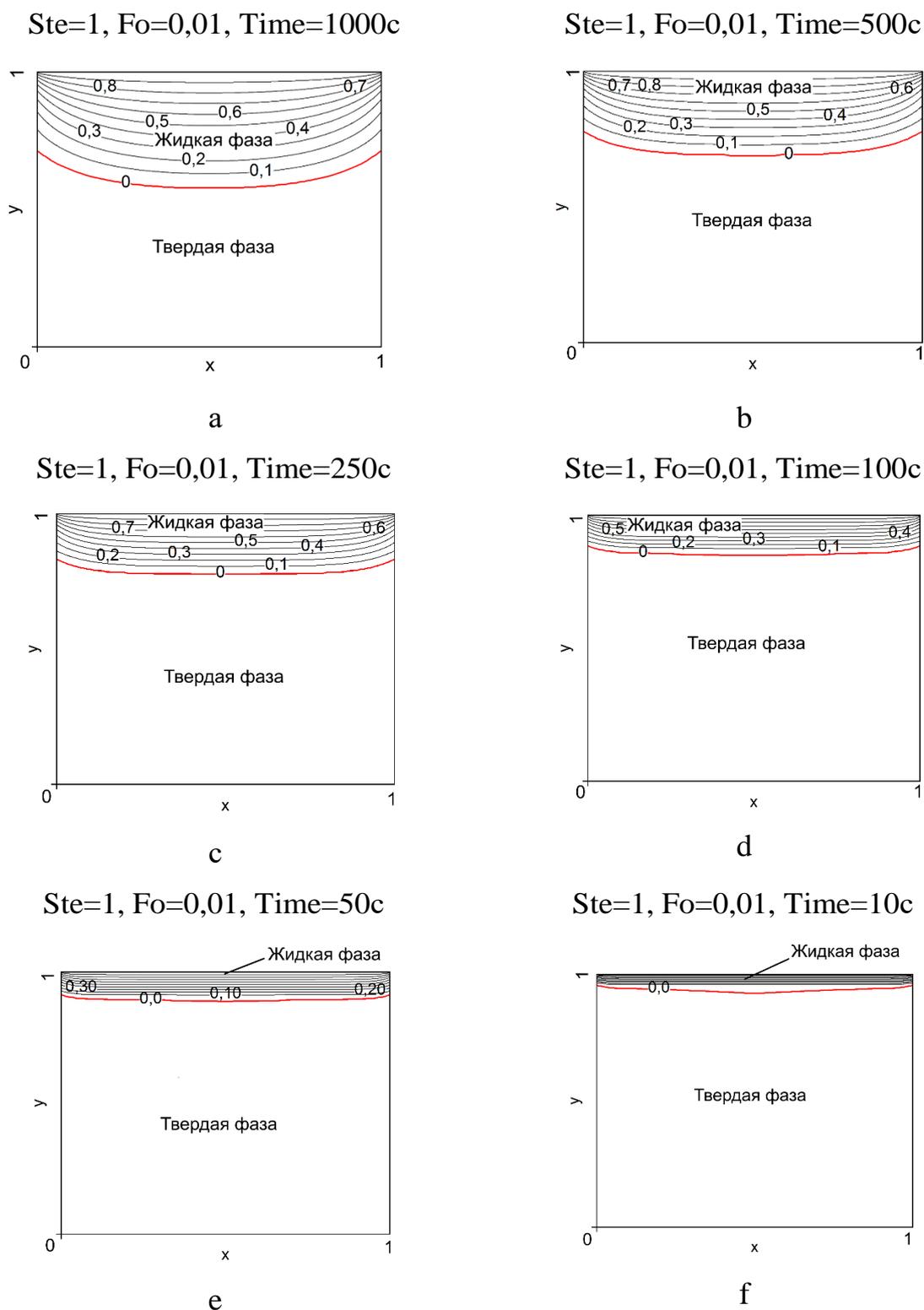


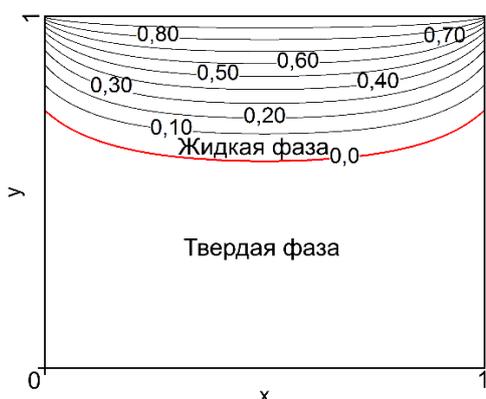
Рисунок 3.1 – Изотермы различных нестационарных режимов

Исходя из полученных результатов можно сказать, что с уменьшением времени, фронт плавления пластины смещается по высоте к $y \rightarrow 1$, это значит, что за маленькое время пластина не успевает пройти полный фазовый переход.

3.2 Влияние числа Фурье

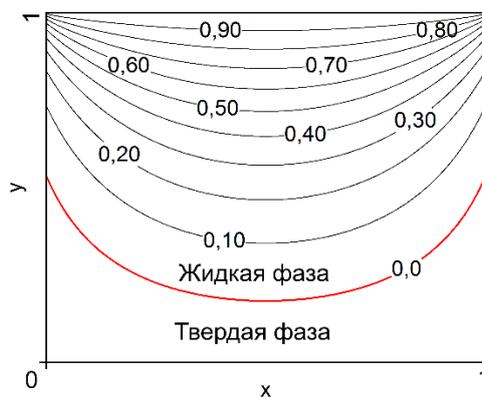
Рассмотрено влияние числа Фурье на температурное распределение в пластине при постоянных числах Стефана $Ste=1$ и Био $Bi=10$ за время $Time=10$. Изотермы, полученные при решении изображены на рисунке 3.2.

Ste=1, Bi=10, Time=10, Fo=0,01



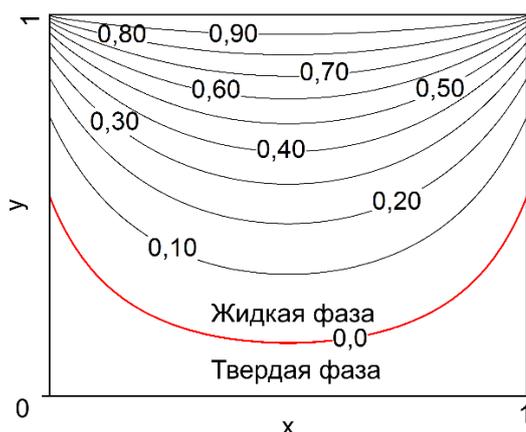
a

Ste=1, Bi=10, Time=10, Fo=0,1



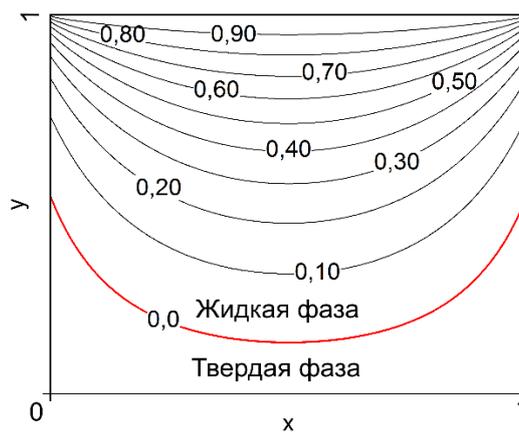
b

Ste=1, Bi=10, Time=10, Fo=0,2



c

Ste=1, Bi=10, Time=10, Fo=0,3



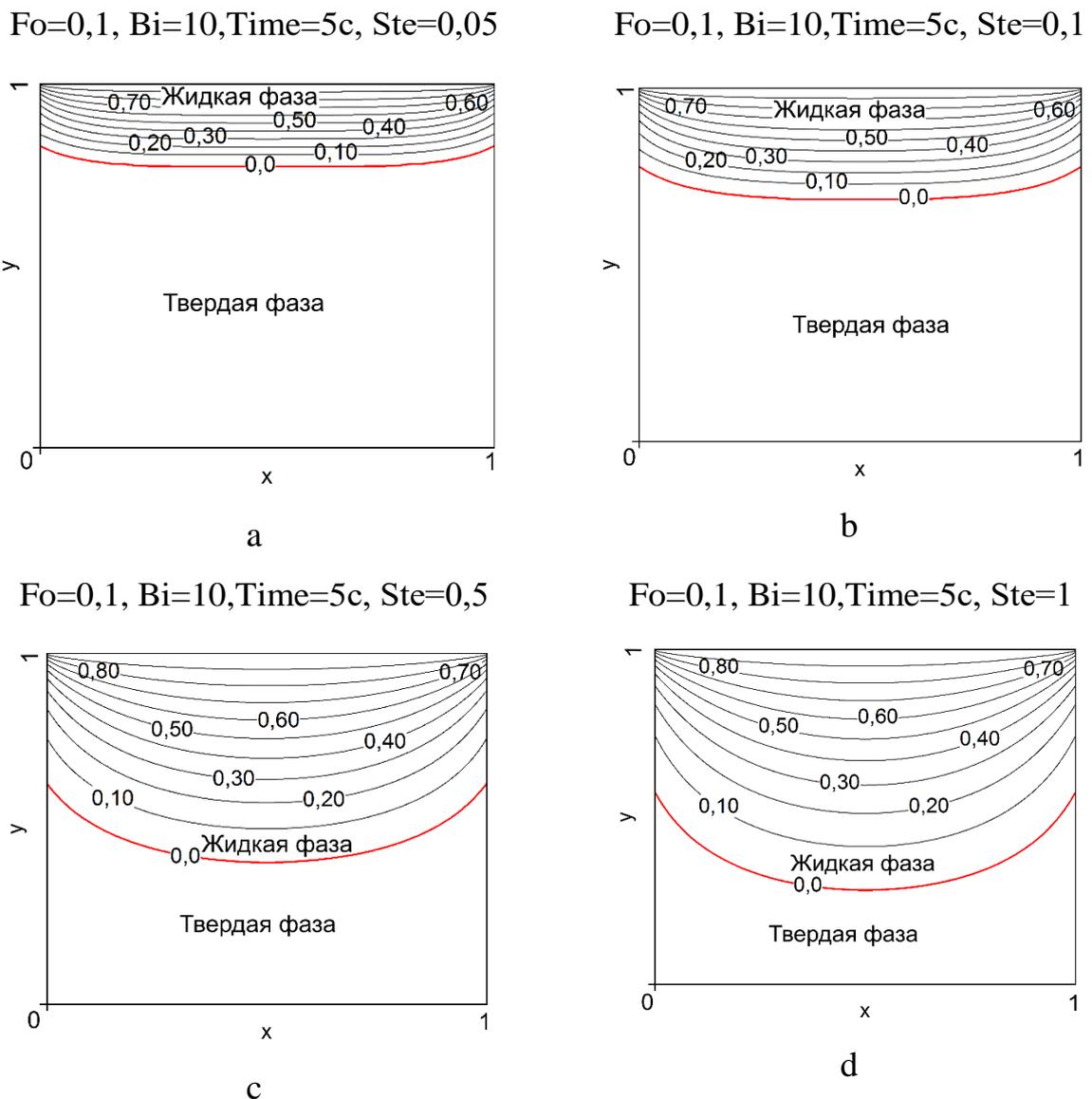
d

Рисунок 3.2 – Изотермы полученные при варьировании числа Фурье

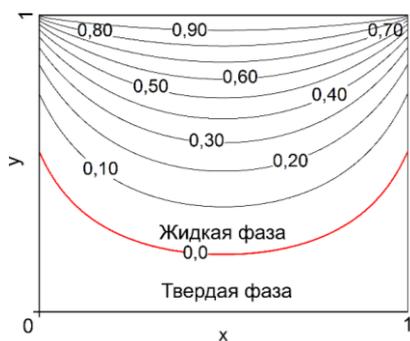
С увеличением числа Фурье фронт плавления смещается по высоте к $y \rightarrow 0$. Поскольку число Фурье зависит от значений коэффициента температуропроводности и характерного размера, можно сделать вывод, что при значении коэффициента температуропроводности большем характерного размера, пластина будет проходить полный фазовый переход.

3.3 Влияние числа Стефана

Рассмотрено влияние числа Стефана на температурное распределение в пластине при постоянных числах Фурье $Fo=0,1$ и Био $Bi=10$ за время $Time=5$. Изотермы, полученные при решении изображены на рисунке 3.3.



$Fo=0,1, Bi=10, Time=5c, Ste=2$



е

Рисунок 3.3 – Изотермы, полученные при варьировании числа Стефана

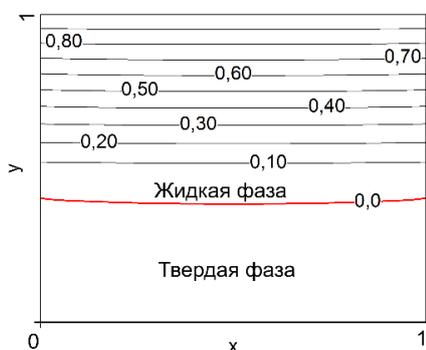
При увеличении числа Стефана фронт плавления смещается по высоте к $y \rightarrow 0$. Так как число Стефана определяется как отношение явной теплоты к скрытой, значит, если значение явной теплоты больше значения скрытой, хотя бы в 2 раза, пластина будет проходить полный фазовый переход.

3.4 Влияние числа Био

Рассмотрено влияние числа Био на температурное распределение в пластине при постоянных числах Фурье $Fo=0,1$ и Стефана $Ste=1$ за время $Time=20c$. Изотермы, полученные при решении изображены на рисунке 3.4.

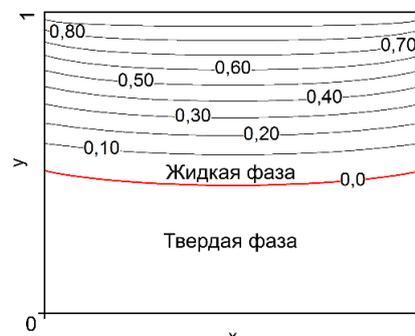
Исходя из полученных результатов видно, что при малых значениях числа Био $Bi \rightarrow 0$, температура по длине пластины не изменяется, а при

$Ste=1, Fo=0,01, Time=20c, Bi=0,1$



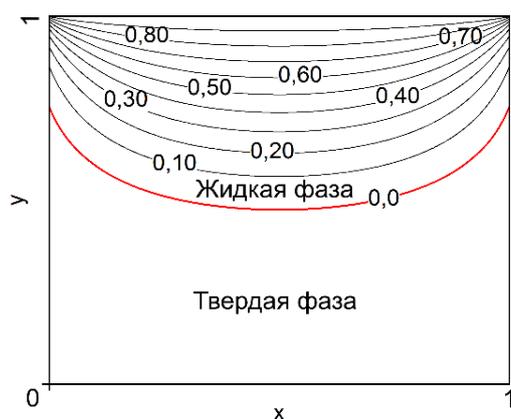
а

$Ste=1, Fo=0,01, Time=20c, Bi=1$



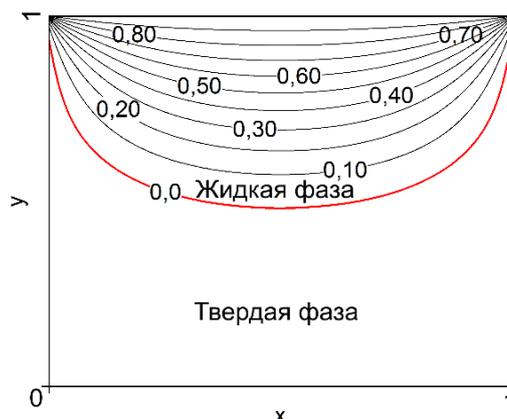
б

Ste=1, Fo=0,01, Time=20с, Bi=20



с

Ste=1, Fo=0,01, Time=20с, Bi=100



д

Рисунок 3.4 – Изотермы, полученные при варьировании числа Био

значительном увеличении числа Био фронт плавления практически не смещается, но принимает дугообразную форму, следовательно, данный критерий не имеет особого влияния на расположение фронта плавления.

Вывод по разделу

На сегодняшний день моделирование процессов является актуальной задачей, поскольку он позволяет получить результат с минимальными затратами. В ходе исследования достигнуты все поставленные задачи. Изучена информация в области моделирования процессов плавления и солидификации. Разработана работоспособная программа для проведения численных исследований процесса плавления. В работе проведено исследование влияния безразмерных критериев и времени на расположение фронта плавления в пластине. Показано, что при увеличении значений, изменяется расположение фронта плавления.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Введение

Разработка НИ производится группой работников, состоящей из двух человек – руководителя и студента.

Предмет исследования: Данная выпускная квалификационная работа заключается в исследовании процессов плавления и солидификации энтальпийным методом.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности НИ, оценка его эффективности, уровня возможных рисков, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Оценить коммерческий потенциал и перспективность разработки НИ;
2. Осуществить планирование этапов выполнения исследования;
3. Рассчитать бюджет затрат на исследования;
4. Произвести оценку научно-технического уровня исследования и оценку рисков.

4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Сегменты рынка потенциальных потребителей.

В качестве потенциальных потребителей результатов проведенного исследования процессов плавления и солидификации энтальпийным методом выступают компании или предприятия, связанные с электроникой, которые выпускают системы охлаждения.

Примером предприятия потребителя является компании Apple, Xiaomi, M.Видео, Intel и др.

4.2 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Рассмотрим системы охлаждения с фазовым переходом, вентиляционную систему охлаждения и жидкостное охлаждение. Системы охлаждения с фазовым переходом основаны на поглощении тепла за счет фазового перехода, то есть не требуют дополнительных затрат на электроэнергию. Напротив же вентиляционная и жидкостная система требует затрат на электроэнергию, поскольку вентилятор необходимо вращать, путем подключения к питанию, а жидкостную систему циркулировать.

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений представлена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Бф	Бв	Бж	Кф	Кв	Кж
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,1	4	3	5	0,4	0,3	0,5
2. Энергоэкономичность	0,2	5	5	2	1	1	0,4
3. Надежность	0,1	4	3	4	0,4	0,3	0,4
4. Простота эксплуатации	0,2	5	4	5	1	0,8	1
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,1	4	4	5	0,4	0,4	0,5

2. Цена	0,3	5	4	3	1,5	1,2	0,9
Итого	1	27	23	24	4,7	4	3,7

Где Бф– система охлаждения с фазовым переходом;

Бв– вентиляционная система охлаждения;

Бж– жидкостная система охлаждения.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \times B_i \quad (4.1)$$

где К – конкурентоспособность вида;

B_i – вес критерия (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

По данным оценочной карты можно увидеть, что использование системы охлаждения с фазовым переходом экономически потребителю. Из этого можно сделать вывод, что исследование процесса плавления и солидификации для системы охлаждения с фазовым переходом актуально.

4.3 SWOT-анализ

Произведем также в данном разделе SWOT – анализ НИ, позволяющий оценить факторы и явления, способствующие или препятствующие продвижению проекта на рынок.

Сильные стороны – это факторы, которые положительно сказываются на развитии проекта. Сюда обычно включают все, что превращает функционирование в успешную и конкурентную работу.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта: тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая

поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту.

На первом этапе SWOT анализа в таблице 4.2 были описаны сильные и слабые стороны проекта, выявлены возможности и угрозы реализации НИ.

Таблица 4.2 – Матрица SWOT анализа

Сильные стороны	Возможности во внешней среде
<p>С1. Довольно быстрое распространения системы охлаждения;</p> <p>С2. Использование систем охлаждения с фазовым переходом несет в себе экономичность и ресурсоэффективность;</p> <p>С3. Данная система не занимают большое пространство;</p> <p>С4. Отсутствие затрат на электроэнергию.</p>	<p>В1. Нетрудоемкая адаптация научного исследования под иностранные языки;</p> <p>В2. Большой эффект экономии финансовых ресурсов;</p> <p>В3. Публикации о проекте в тематических журналах;</p>
Слабые стороны	Угрозы внешней среды
<p>Сл1. Малая изученность процессов плавления и солидификации энтальпийным методом;</p> <p>Сл2. Значительные временные затраты;</p> <p>Сл3. Большая затрата электроэнергии на проведение НИ</p>	<p>У1. Отсутствие спроса на данный метод;</p> <p>У2. Подорожание материалов с фазовыми переходами;</p> <p>У3. Развитая конкуренция технологий производства..</p>

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень

необходимости проведения стратегических изменений. В рамках данного этапа необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Возможно использование этой матрицы в качестве одной из основ для оценки вариантов стратегического выбора. Каждый фактор помечается либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-». Интерактивная матрица проекта представлена в табл. 4.3.

Таблица 4.3 - Интерактивная матрица сильных и слабых сторон и возможностей

Возможности проекта	Сильные стороны				Слабые стороны		
		C1	C2	C3	C4	Сл1	Сл2
B1	-	-	+	+	0	0	-
B2	+	+	+	+	-	+	+
B3	+	+	-	+	+	+	-

Таблица 4.4 - Интерактивная матрица сильных сторон и слабых сторон и угроз

Угрозы проекта	Сильные стороны				Слабые стороны			
		C1	C2	C3	C4	Сл1	Сл2	Сл3
У1	+	0	-	-	+	+	+	-
У2	-	+	-	+	-	-	+	+
У3	-	-	-	-	+	+	+	-

Анализ интерактивных таблиц представляется в форме записи сильно коррелирующих сильных сторон и возможностей или слабых сторон и возможностей:

- B2C1C2C3;
- B3Сл1; B3Сл2Сл3;
- У1С1;

- У2Сл3.

Самой большой угрозой для проекта является подорожание материалов с фазовыми переходами.

В рамках третьего этапа составляется итоговая матрица SWOT-анализа, представленная в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Итоговая матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Довольно быстрое распространения системы охлаждения;</p> <p>С2. Использование систем охлаждения с фазовым переходом несет в себе экономичность и ресурсоэффективность;</p> <p>С3. Данная система не занимают большое пространство;</p> <p>С4. Отсутствие затрат на электроэнергию.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Малая изученность процессов плавления и солидификации энтальпийным методом;</p> <p>Сл2. Значительные временные затраты;</p> <p>Сл3. Большая затрата электроэнергии на проведение НИ</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Нетрудоемкая адаптация научного исследования под иностранные языки;</p> <p>В2. Большой эффект экономии финансовых ресурсов;</p> <p>В3. Публикации о проекте в тематических журналах;</p>	<p>Использование нового вида охлаждения влечет за собой резкий экономический положительный эффект и дальнейшее развитие систем охлаждения.</p>	<p>Недостаточная изученность процессов фазового перехода энтальпийным может привести к неправильной математической модели</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Отсутствие спроса на данный метод;</p> <p>У2. Подорожание материалов с фазовыми переходами;</p> <p>У3. Развитая конкуренция технологий производства..финансирования.</p>	<p>Отсутствие спроса влияет на актуальность использования инфракрасных излучателей</p>	<p>Самой большой угрозой для проекта является подорожание материалов с фазовым переходом</p>

4.4 Планирование работ по научно-техническому исследованию

4.4.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

Перечень этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований	Бакалавр
	3	Подбор и изучение материалов по теме	Бакалавр
	4	Календарное планирование работ	Руководитель Бакалавр
Теоретические и	5	Создание математической модели	Руководитель Бакалавр

экспериментальные исследования	6	Проведение серии экспериментов	Бакалавр
Обобщение и оценка результатов	7	Оценка эффективности полученных результатов	Бакалавр
Оформление отчета по НИР	8	Составление пояснительной записки	Бакалавр

4.4.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, который зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (4.2)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.;

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ по нескольким исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{q_i}, \quad (4.3)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб.дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

4.4.3 Разработка графика проведения научного исследования

Наиболее удобным и наглядным представлением проведения научных работ является построение ленточного графика в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построение графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (4.4)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - (T_{\text{вых}} + T_{\text{пр}})}, \quad (4.5)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Расчет коэффициента календарности:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - (T_{\text{вых}} + T_{\text{пр}})} = \frac{365}{365 - 118} = 1,48$$

Таблица 4.7 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Исполнители	Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	T_{min} , чел–дни		T_{max} , чел–дни		$T_{ож}$, чел– дни			Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2					
Выбор темы ВКР	1	1	2	2	1,4	1,4	Студент, научный руководитель	1	1	1	1
Составление и утверждение плана работ	1	1	2	2	1,4	1,4	Научный руководитель	1	1	1	1
Подбор и изучение материалов по теме	2	2	4	4	2,8	2,8	Студент	2	2	2	2
Выбор направления исследования	1	1	3	2	1,8	1,4	Студент, научный руководитель	2	2	2	2
Календарное планирование работ	1	1	3	4	1,8	2,2	Студент, научный руководитель	2	3	2	3
Подбор и изучение материалов по теме	9	10	12	16	10,2	12,4	Студент	12	13	16	17

Создание математической модели	5	6	8	9	6,2	7,2	Студент, научный руководитель	7	7	9	9
Проведение серии экспериментов	10	12	12	15	10,8	13,2	Студент	11	14	13	18
Оценка эффективности полученных результатов	4	4	6	6	4,8	4,8	Студент	4	5	4	7
Написание раздела «Финансовый менеджмент»	4	4	6	6	4,8	4,8	Студент	5	5	5	5
Написание раздела «Социальная ответственность»	1	2	3	4	1,8	2,8	Студент	1	2	1	2
Оформление ВКР	5	4	7	7	5,8	5,2	Студент	5	6	5	8

Составлен план научного исследования, в котором разработан календарный план выполнения работ. Для построения таблицы временных показателей проведения НИ был рассчитан коэффициент календарности. С помощью показателей в табл. 4.8 был разработан календарный план-график проведения НИ по теме. Для иллюстрации календарного плана была использована диаграмма Ганта, указывающая на целесообразность проведения данного исследования.

Таблица 4.8. Календарный план-график проведения научного исследования

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т _{ки} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				февраль		март			апрель			май					
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
1	Выбор темы ВКР	Ст, НР	1	■													
2	Составление и утверждение плана работ	НР	1	■													
3	Подбор и изучение материалов по теме	Ст	2		■												
4	Выбор направления исследования	Ст, НР	2		■	■											
5	Календарное планирование работ	Ст, НР	2			■	■										
6	Подбор и изучение материалов по теме	Ст	16			■	■	■	■								
7	Создание математической модели	Ст, НР	9					■	■	■							
8	Проведение серии экспериментов	Ст	13					■	■	■	■	■					
9	Оценка эффективности	Ст	4										■	■			

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Таблица 4.9 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество		Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (Зм), руб.	
		Исп.1	Исп.2		Исп.1	Исп.2
Материал с фазовым переходом, Галлий	Гр.	50	50	2000	2000	2000
Итого, руб.					2000	2000

Общие материальные затраты составили 4000 руб.

4.5.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене. При приобретении спецоборудования необходимо учесть затраты по его доставке и монтажу в размере 15% от его цены. Расчет затрат по данной статье представлен в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., тыс. руб.	Затраты на материалы, (Зм), тыс. руб.

		Исп. 1	Исп. 2		Исп. 1	Исп. 2
Персональный компьютер	Шт	1	1	50	50	50
Программное обеспечение (MATLAB	Шт.	1	1	2	2	2
Итого:					52	52

4.5.3 Основная заработная плата исполнителя темы

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 окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20-30 % от тарифа или оклада. Расчет основной заработной платы приводится в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Расчет основной заработной платы

№ п/п	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.		Зарботная плата, приходящаяся на один чел.-дн.		Всего заработная плата по тарифу (окладам), тыс. руб.	
			Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2
1.	Выбор темы ВКР	Ст, НР	1	1	5,1		5,1	5,1
2.	Составление и утверждение плана работ	НР	1	1	3,1		3,1	3,1
3.	Подбор и изучение материалов по теме	Ст	2	2	2		4	4
4.	Выбор направления исследования	Ст, НР	2	2	5,1		10,2	10,2

5.	Календарное планирование работ	Ст, НР	2	3	5,1	10,2	15,3
6.	Подбор и изучение материалов по теме	Ст	12	13	2	24	26
7.	Создание математической модели	Ст, НР	7	7	2	14	14
8.	Проведение серии экспериментов	Ст	11	14	5,1	56,1	71,4
9.	Оценка эффективности полученных результатов	Ст	4	5	2	8	10
10.	Написание раздела «Финансовый менеджмент»	Ст	5	5	2	10	10
11	Написание раздела «Социальная ответственность»	Ст	1	2	2	2	4
12	Оформление ВКР	Ст	5	6	2	10	12
Итого						156,7	185,1

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату и рассчитывается по формуле:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (4.7)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12–20 % от $Z_{осн}$).

Основная заработная плата руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p \quad (4.8)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} \quad (4.9)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5–дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6–дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 4.12 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней - выходные дни - праздничные дни	118	118
Потери рабочего времени - отпуск - невыходы по болезни	48 0	72 0
Действительный годовой фонд рабочего времени	199	175

Месячный должностной оклад работника (руководителя):

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p \quad (4.10)$$

где $Z_{тс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30 процентов от $Z_{тс}$);

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Тарифная заработная плата $Z_{тс}$ находится из произведения тарифной ставки работника 1-го разряда $T_{с1} = 600$ руб. на тарифный коэффициент k_t и учитывается по единой для бюджетной организации тарифной сетке.

Тарифный коэффициент для НР = 1,866; для С = 1,407.

Расчет основной заработной платы представлен в таблице 4.13

Таблица 4.13 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Разряд	k_t	$Z_{тс}$, руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	Тр, раб. дн.		$Z_{осн}$, руб.	
									Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2
Научный руководитель	Старший преподаватель	1,866	45000	0,3	0,4	1,3	99450	5197	13	17	67561	88349
Студент	Инженер	1,407	15000	0,3	0,3	1,3	29250	1872	52	60	97344	112320
Итого											164905	200669

4.5.4 Расчет дополнительной заработной платы

Дополнительная заработная плата учитывает величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы рассчитывается по формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} , \quad (4.11)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы, принятый на стадии проектирования за 0,15.

Тогда дополнительная заработная плата руководителя при исполнении 1:

$$З_{\text{доп}} = 0,15 \cdot 67561 = 10134,15 \text{ руб.}$$

Тогда дополнительная заработная плата студента при исполнении 1:

$$З_{\text{доп}} = 0,15 \cdot 97344 = 14601,6 \text{ руб.}$$

Тогда дополнительная заработная плата руководителя при исполнении 1:

$$З_{\text{доп}} = 0,15 \cdot 88349 = 13252,35 \text{ руб.}$$

Тогда дополнительная заработная плата студента при исполнении 1:

$$З_{\text{доп}} = 0,15 \cdot 112320 = 16848 \text{ руб.}$$

4.5.5 Отчисления во внебюджетные фонды

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) \quad (4.12)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

В соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30,2%.

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
-------------	---------------------------------	---------------------------------------

	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2
Руководитель проекта	67561	88349	10134,15	13252,35
Студент	97344	112320	14601,6	16848
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,302			
Итого				
Исполнение 1	57271,5			
Исполнение 2	69692,3			

4.5.6 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов. Их величина определяется по формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\sum \text{статей}) \cdot k_{\text{нр}} \quad (4.13)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

Накладные расходы составили при исполнении 1:

$$\begin{aligned} Z_{\text{накл}} &= (2000 + 52000 + 164905 + 24735,75 + 57271,5) \cdot 0,16 \\ &= 48145,96 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Накладные расходы составили при исполнении 2:

$$\begin{aligned} Z_{\text{накл}} &= (2000 + 52000 + 200669 + 30100,35 + 69692,3) \cdot 0,16 \\ &= 56713,864 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Таблица 4.15 –Смета затрат на проект

Наименование статьи	Сумма, руб.		Примечание
	Исп.1	Исп.2	
1. Материальные затраты НТИ	2000	2000	Пункт 4.5.1
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	52000	52000	Пункт 4.5.2

3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	164905	200669	Пункт 4.5.3
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	24735,75	30100,35	Пункт 4.5.4
5. Отчисления во внебюджетные фонды	57271,5	69692,3	Пункт 4.5.5
6. Затраты на научные и производственные командировки	-		Отсутствуют
7. Контрагентские расходы	-		Отсутствуют
8. Накладные расходы	48145,96	56713,864	Пункт 4.5.6
9. Бюджет затрат НИИ	300912,25	354461,65	

4.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической 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.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования определяется как:

$$I_{\text{фин.р}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (4.14)$$

где $I_{\text{фин.р}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

$$I_{\text{фин.р}}^{\text{исп1}} = \frac{300912,25}{354461,65} = 0,84;$$

$$I_{\text{фин.р}}^{\text{исп2}} = \frac{354461,65}{354461,65} = 1;$$

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

$$I_{pi} = \sum_{i=1}^n a_i \times b_i \quad (4.15)$$

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

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

n – число параметров сравнения.

Таблица 4.16 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии \ Объект исследования	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,2	5	3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,25	5	4
3. Энергосбережение	0,15	5	3
4. Надежность	0,2	5	4
5. Материалоемкость	0,2	4	3
Итого	1	4,8	3,45

$$I_{p-исп1} = 0,2 \cdot 5 + 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 = 4,8;$$

$$I_{p-исп2} = 0,2 \cdot 3 + 0,25 \cdot 4 + 0,15 \cdot 3 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 3 = 3,45;$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{исп1}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{фин.р}} = \frac{4,8}{0,84} = 5,7$$

$$I_{\text{исп2}} = \frac{I_{\text{р-исп2}}}{I_{\text{фин.р}}^{\text{исп2}}} = \frac{3,45}{1} = 3,45;$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных.

Сравнительная эффективность проекта ($\mathcal{E}_{\text{ср}}$):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп2}}}{I_{\text{исп1}}} \quad (4.16)$$

Таблица 4.17 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,84	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,8	3,45
3	Интегральный показатель эффективности	5,7	3,45
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,6

Выводы по разделу

Сравнивая полученные значения НТИ, можно сделать вывод о том, что реализация НТИ в первом исполнении эффективнее в финансовом плане на 53549,4 рублей и в ресурсном плане, как по временному ресурсу на 8 дней для студента и на 1 день для научного руководителя, так и по использованному материалом.

5 Социальная ответственность

Введение

Исследование процесса плавления и солидификации энтальпийным методом математическим моделированием позволяет быстро, дешево и точно получить качественную и количественную информацию об исследуемом объекте.

Описывается решение уравнения теплопроводности энтальпийным методом. Для получения оптимальных значений теплофизических характеристик материала в работе моделируется процесс охлаждения за счет фазового перехода, для создания охлаждающего чипа. В начальный момент времени материал берется при значении температуры равной температуре фазового перехода, образуется фронт плавления и изучается влияние безмерных критериев на расположение фронта плавления. На основе полученных данных можно судить о теплофизических свойствах материала.

Моделирование процессов энтальпийным методом применяется в энергетике. Потенциальными пользователями являются компании, связанные с электроникой, такие как Apple, Xiaomi, М.Видео, Intel и др.

Исследование проводилось в помещении площадью 15 м². В использованное оборудование входит компьютер, программа Matlab. Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне: моделирование процессов плавления и солидификации.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Трудовой кодекс РФ позволяет контролировать отношения между организацией и сотрудниками, включая размер заработной платы, выходные, отпуска и т.д.

Основным документом, регулирующим трудовые отношения между работником и работодателем, является ТК РФ [30]. В него входят нормы по регламентированию продолжительности работы, ее оплаты, компенсации при

работе во вредных условиях, защиты персональных данных работников, социальных выплат работодателем, о социальной страховке и о пенсионном обслуживании.

Согласно [30] продолжительность рабочего времени составляет 40 часов в неделю в оптимальных условиях внешней среды. В течение рабочего дня (смены) работнику предоставляется перерыв для отдыха и питания продолжительностью от 30 минут до 2 часов. Время предоставления перерыва и его конкретная продолжительность устанавливаются в правилах внутреннего трудового распорядка или по соглашению между работником и работодателем. Работник имеет право на:

- рабочее место, соответствующее государственным нормативным требованиям охраны труда и условиям, предусмотренным коллективным договором;
- полную достоверную информацию об условиях труда и требованиях охраны труда на рабочем месте, включая реализацию прав, предоставленных законодательством о социальной оценке условий труда;
- защиту своих трудовых прав, свобод и законных интересов всеми не запрещенными законом способами;
- возмещение вреда, причиненного ему в связи с исполнением трудовых обязанностей, и компенсацию морального вреда;
- обязательное социальное страхование в случаях, предусмотренных федеральными законами;
- обеспечение средствами индивидуальной защиты 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

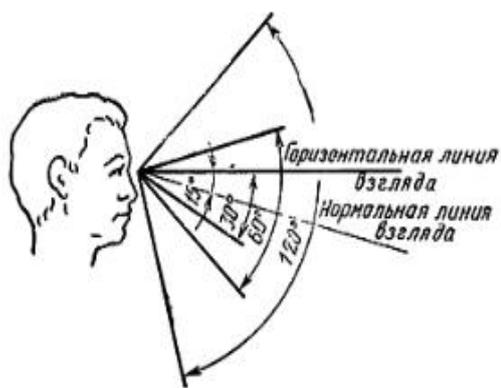


Рисунок 5.3 – Зоны зрительного наблюдения в вертикальной плоскости

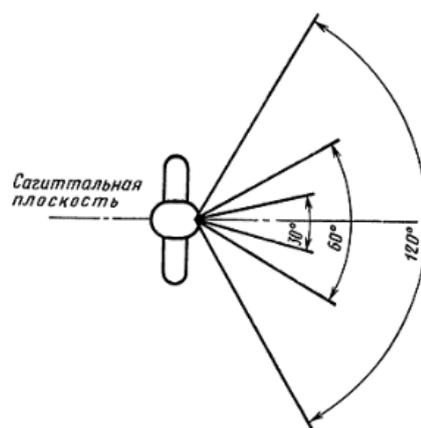


Рисунок 5.4 – Зоны зрительного наблюдения в горизонтальной плоскости

5.2 Производственная безопасность

Согласно ГОСТ 12.0.003 – 2015 ССБТ. «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [33] выявим производственные факторы и проведем анализ.

Таблица 5.1 – Возможные опасные и вредные производственные факторы на рабочем месте при разработке проектного решения

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
Вредные факторы	
Нервно-психические перегрузки, монотонность трудового процесса	Р 2.2.2006–05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. [35]
Умственное перенапряжение	Р 2.2.2006–05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса.

	Критерии и классификация условий труда. [35]
Перенапряжение зрительного анализатора	Р 2.2.2006–05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. [35]
Статические перегрузки, связанные с рабочей позой	ГОСТ 12.2.032-78 Рабочее место при выполнении работ сидя; [32]
Отсутствие или недостатки необходимого искусственного освещения;	СП 52.13330.2016. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий [36].
Длительное сосредоточенное наблюдение	СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [37]
Повышенный уровень электромагнитных излучений	СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [37]
Опасные факторы	
Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под	В «Правила устройства электроустановок, ПУЭ» описываются меры предосторожности для предотвращения поражения электрическим током. [38]

действие которых попадает работающий.	
--	--

1) При математическом моделировании опасным фактором является фактор, связанный с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий. В «Правила устройства электроустановок, ПУЭ» [38] описываются меры предосторожности для предотвращения поражения электрическим током. Так как ПК работает на электрическом токе появляется риск поражения электрическим током при происшествиях или при несоблюдении правил безопасности.

В зависимости от силы тока и его пути по человеческому телу могут проявлять такие болезни, как электрический шок, электроофтальмия, электрические ожоги, металлизация кожи.

Не существует безопасной величины электрического тока, но есть значения ощутимого тока – 0,8-1,2 мА, неотпускающего тока, когда человек не может отпустить токопроводящую часть из-за сильной судороги – 10-16 мА и фибрилляционный ток – 100 мА и более при поражении током такой силы происходит клиническая смерть или смерть от удушья следствии судорожного состояния сердца или легких.

Для минимизации случаев поражения электрическим током необходимо огородить места повешенной опасности, использовать изолирующие устройства и покрытия и устройства защитного заземления.

2) Нервно-психические перегрузки, монотонность трудового процесса.

В результате нервно-психических перегрузок может пострадать нервная система работника, органы чувств и эмоциональное состояние человека.

Для уменьшения воздействия этого вредного фактора необходимо проводить мероприятия по снижению стресса. Например, вести здоровый

образ жизни, полноценно восстанавливаться после рабочего дня, выполнять разминку в время рабочего процесса.

Зачастую этому фактору подвержены программисты, работающие с большим объемом данных и проводящих длительное время за программированием.

3) Умственное перенапряжение

При умственном перенапряжении истощаются клетки мозга от постоянной чрезмерной нагрузки. Умственное перенапряжение сложнее поддается лечению, так как физически оно начинает проявляться, когда процесс уже заходит далеко. В большинстве случаев умственное перенапряжение сопровождается нарушением сна.

Для решения данной проблемы необходимо отдыхать через некоторый интервал времени. Самая лучшая поза для отдыха считается, сидя на полу, поджав под себя ноги «по-турецки». Эта поза снимает напряжение (и нервное, и мышечное), что позволяет мозгу в это время функционировать без особых усилий. Кроме того, такая поза улучшает работу всех органов нижней половины тела.

4) Перенапряжение зрительного анализатора

Как правило, усталость глаз вследствие перенапряжения зрительного анализатора сопровождается непостоянным снижением зрения, слезотечением или сухостью глаза и головными болями. Однако при длительном существовании астигматизма может стимулировать развитие близорукости.

Для предотвращения заболеваний необходимо соблюдение режима зрительной работы, ликвидация отраженного света и бликов, настройка технических параметров приборов.

5) Статические перегрузки, связанные с рабочей позой

В случае выполнения работ в течении продолжительного времени без смены позы, накапливается напряжение в мышцах спины и мышцах шеи. Это происходит в случае работы за компьютером, или в случае выполнения однообразных операций вручную, например, сборке чего-либо, и т.п.

Для защиты от этого фактора рекомендуется во время такой работы делать короткий перерыв на разминку каждый час, и длинный перерыв каждые три часа. Также можно делать перерывы, общие для всех работников, находящихся в одном помещении для совместной разминки. Также необходимо уделить особое внимание непосредственно организации самих рабочих мест: рабочее место при работе сидя должно быть организовано в соответствии с требованиями ГОСТ 12.2.032-78. Рабочее место при выполнении работ сидя [32].

б) Отсутствие или недостатки необходимого искусственного освещения;

Данный фактор приводит к снижению общего самочувствия работника. При хроническом воздействии происходит ухудшение зрения.

Рекомендуется помимо естественного освещения из окон, использовать искусственное освещение электрическими светильниками. Оно может быть представлено двумя видами: общее равномерное (светильники на потолке) и местное (осветители непосредственно на рабочих местах).

Таблица 5.2 - Требования к освещению

Характеристика зрительной работы	Наименьший или эквивалентный размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Относительная продолжительность зрительной работы при направлении зрения на рабочую поверхность, %	Искусственное освещение				Естественное освещение	
				средняя освещенность на рабочей поверхности, лк,	цилиндрическая освещенность, лк	объединенный показатель UGR , не более	коэффициент пульсации освещенности K_n , % не более	КЕО e_n , % при	Верхнем или комбинированном боковом

				не менее					
Различие объекто в при фиксиро ванной и нефикси рованно й линии зрения: средней точност и	Более 0,5	B-1	Не менее 70	200	50*	2218**	2015**	2,0	05
		B-2	Менее 70	150	Не регламен тируется	2218**	2015**	2,0	0,5

7) Длительное сосредоточенное наблюдение;

Длительное сосредоточенное наблюдение результатов работы или длительная работа на компьютере приводит к плохому самочувствию работника, а в последствии к ухудшению зрения. В СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [37], описана допустимая величина (в % от времени смены) длительности сосредоточенного наблюдения и составляет от 26 до 50%. Для поддержания здоровья не следует превышать данную норму.

8) Повышенный уровень электромагнитных излучений;

Известно, что ПК являются источником электромагнитного поля (ЭМП) радиочастотного диапазона. При длительном постоянном воздействии, которого на организм человека наблюдаются нарушения сердечнососудистой, дыхательной и нервной систем, появляется утомляемость, ухудшение самочувствия, гипотония, также характерна головная боль, изменение проводимости сердечной мышцы. Тепловое воздействие ЭМП характеризуется повышением температуры тела, локальным избирательным

нагревом тканей, органов, клеток вследствие перехода ЭМП в тепловую энергию.

При работе с компьютером допустимые уровни электромагнитных полей (ЭМП) нормируются СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [37].

ПДУ электромагнитного поля (ЭП) частотой 50 Гц на рабочем месте - 5 кВ/м.

При напряженности ЭП от 5 до 20 кВ/м включительно, допустимое время пребывания рассчитывается по формуле (4.1):

$$T = \frac{50}{E^2}, \quad (4.1)$$

где T - допустимое время пребывания в ЭП при соответствующем уровне напряженности, ч;

E - напряженность ЭП в контролируемой зоне, кВ/м.

5.3 Экологическая безопасность

Загрязнение (окружающей среды, природной среды, биосферы) – это привнесение в окружающую среду (природную среду, биосферу) или возникновение в ней новых, обычно не характерных физических, химических или биологических агентов (загрязнителей), или превышение их естественного среднесуточного уровня в различных средах, приводящее к негативным воздействиям.

Воздействие на селитебную зону:

В ходе проведения эксперимента затрачивается достаточно большое количество электроэнергии. Данный фактор обусловлен из – за специфики проводимых экспериментов в данной работе, так как для создания математической модели, необходимо длительное использование ПК. Предотвращения воздействия на селитебную зону можно добиться приобретением более мощного ПК, который будет работать быстрее и затрачивать меньше электроэнергии.

Загрязнение селитебной зоны отходами после реализации эксперимента. После реализации эксперимента возможны отходы материалов с фазовым переходом, единственный вред какой они могут принести селитебной зоне заключается в создании дискомфорта жителям, если утилизировать их путём выбрасывания в неположенных местах.

Воздействие на литосферу и атмосферу:

После создания математической модели и запуска производства чипа возможны проблемы с утилизацией отработавших чипов, так как многие люди халатно относятся к данному процессу. Данную проблему необходимо решить вознаграждением за правильную утилизацию или возвращением чипа на переработку. Воздействие на атмосферу будет незначительным поскольку чип будет очень маленьким и выделение вредных веществ никак не будет превышать норм.

Воздействие на гидросферу не обнаружено

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Согласно анализу, возможные ЧС на рабочем месте относятся пожар, взрыв, землетрясение.

Рассмотрим более подробно наиболее вероятный вид ЧС – пожар. Возможный источник его возникновения – с ПК или зарядным устройством ПК, которые могут привести к короткому замыканию и сильному нагреву в проводке или микросхемах, который может вызвать тление пластиковых деталей, воспламенение столешницы или предметов, лежащих на столе и вокруг него. Для предотвращения этого необходимо в первую очередь озаботиться пожаробезопасности конструкции, а именно:

- применять качественные стыки проводки (клеммы);
- спрятать все провода в негорючие кабель-каналы;

В случае возникновения пожара в здании автоматически срабатывают датчики пожаротушения, и звуковая система оповещает всех сотрудников о немедленной эвакуации из здания и направляются на выход в соответствии с

планом эвакуации при пожарах и других ЧС. На этаже находится два огнетушителя и пожарных крана, а также три эвакуационных выхода.

Также сотрудники 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. План эвакуации представлен на рисунке 5.1.

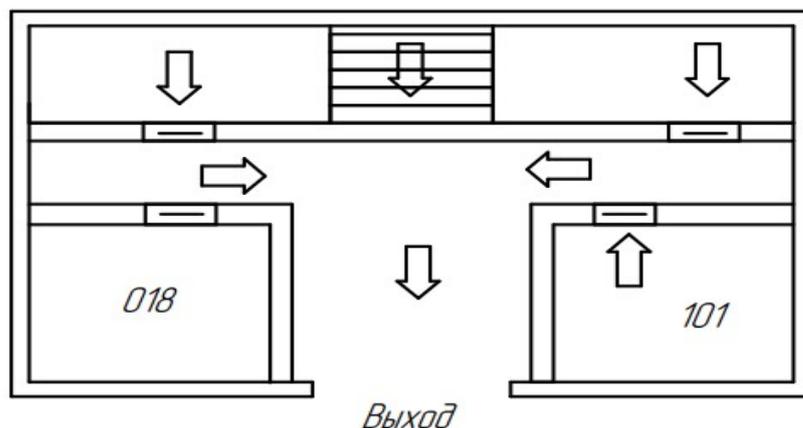


Рисунок 5.5 – Схема эвакуации при пожаре

Возможные пожары могут быть А, С и Е классов, соответственно в первичные средства пожаротушения должны входить переносные или передвижные огнетушители и пожарный кран.

Выводы по разделу социальная ответственность

Таким образом, в работе были рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, позволяющие определять взаимоотношения между организацией и сотрудником, условия труда, а также характеристику рабочего места работника.

Фактических значений потенциально возможных факторов по нормативным значениям не выявлено.

Персонал относится к I группе по электробезопасности, то есть неэлектротехнический персонал.

Лаборатории по электробезопасности относится к 1 категории электробезопасности. Влажность воздуха в помещении лежит в пределах 60-75%. Не осуществляется технологических процессов – нет технологической токопроводящей пыли. Температура помещения до 20 °С. Пол выполнен из керамической плитки.

При выполнении исследовательской работы тяжесть труда была категории Ia.

Категория помещения по взыво- и пожарной опасности Г.

Категория помещения III «Объекты, оказывающие незначительное негативное воздействие на окружающую среду» по тому, как помещение оказывает влияние на окружающую среду.

Заключение

В рамках выпускной квалификационной работы было численное исследование процессов плавления и солидификации энтальпийным методом. В ходе исследования достигнуты все поставленные задачи. Изучена информация в области моделирования процессов плавления и солидификации. Разработана работоспособная программа для проведения численных исследований процесса плавления. В работе проведено исследование влияния безразмерных критериев и времени на расположение фронта плавления в пластине. Показано, что при увеличении значений, изменяется расположение фронта плавления.

По итогу выполнения раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» было произведено сравнение значений НТИ, можно сделать вывод о том, что реализация НТИ в первом исполнении эффективнее в финансовом плане. В разделе «Социальная ответственность» рассмотрена социальная ответственность предприятия, указаны пагубные воздействия на человека и меры их предотвращения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. The melting and solidification of ice / L. Jojokamalo, Dr. F. Bierbrauer // *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. – 2008 – Vol. 2 – P. 284-298
2. Mazzeo D. Analytical model for solidification and melting in a finite PCM in steady periodic regime / Mazzeo D., Oliveti G., De Simone M., Arcuri N. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 2015– Vol. 88 – P. 844-861.
3. Koshizuka S. Chapter 4 - Boundary Conditions / Koshizuka S., Shibata K., Kondo M., Matsunaga T. // *Moving Particle Semi-implicit Method* — 2018–P. 155-215.
4. Chai M. Imposing mixed Dirichlet-Neumann-Robin boundary conditions on irregular domains in a level set/ghost fluid based finite difference framework / Chai M., Luo K., Wang H., Zheng Sh., Fan J. // *Computers & Fluids*. — 2021– Vol. 214– 104772.
5. Chai M. A finite difference discretization method for heat and mass transfer with Robin boundary conditions on irregular domains / Chai M., Luo K., Shao Ch., Wang H., Fan J. // *Journal of Computational Physics*— 2020– Vol. 400– 108890.
6. Numerical method for transient heat flow / Dusinberre G.M. // *Transactions of the ASME*— 1945– Vol. 67.
7. О задаче Стефана: Математический сборник / Каменомостская С.Л. — 1961– Т.53– №4.
8. Бучко Н.А. Энтальпийный метод численного решения задач теплопроводности в промерзающих или протаивающих грунтах / Бучко Н.А. // *Вестник международной академии холода*— 2009– №2– С. 25-28.
9. Бирюков В.А. Численное моделирование трехмерной задачи таяния искусственного ледяного острова энтальпийным методом / Бирюков В.А., Миряха В.А., Петров И.Б. // *Журнал Полярная механика*— 2018– №4– С. 81-86.

10. Бараненко А.В. Применение веществ с фазовыми переходами для аккумулирования тепловой энергии / Бараненко А.В., Кузнецова П.А., Захарова В.Ю., Цой А.П. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики— 2018—Т. 18— №6— С. 990-1000.
11. Yijia Gu On the phase-field modeling of rapid solidification / Yijia Gu, Xiaoming He, Daozhi Han // Computational Materials Science— 2021—Vol. 199— 110812.
12. Laishan Yang Improved multi-order parameter and multi-component model of polycrystalline solidification / Laishan Yang, Zhibo Dong, Lei Wang, Nikolas Provatas // Journal of Materials Science & Technology— 2022—Vol. 101— P. 217-225.
13. Richardson L.F. The Approximate Arithmetical Solution by Finite Differences of Physical Problems / Richardson L.F. // Transactions of the Royal Society— 1910— P. 307-357.
14. Finite-difference methods for partial differential equations / Forsythe G.E., Wasow W.R. // John Wiley & Sons— 1960— P. 444.
15. Smith G.D. Numerical Solution of Partial Difference Equation / Smith G.D. // Oxford University Press— 1965
16. K.J. Binns Analysis and Computation of Electric and Magnetic Field Problems / Binns K.J., Lawrenson P.J. // Pergamon Press— 1973
17. Stoll R.L. Numerical Method of Calculating Eddy Current in Nonmagnetic Conductors / Stoll R.L. // Proceedings of the institution of electrical engineers — 1967—Vol. 114— P. 775-780.
18. Ryff P.F. Calculation Methods for Current Distribution in Single Turn Coils of Arbitrary Cross Section / Ryff P.F., Biringer P.P, Burke P.E. // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems— 1970—Vol. 89— P. 228-232.
19. Sarma M.S. Potential Functions in Electromagnetic Field Problems / IEEE Transactions on Magnetics— 1970—Vol. 6— P. 513-518.

20. Mitchell A.R. The Finite Difference Method in Partial Differential Equations / Mitchell A.R., Griffiths D.F. // John Wiley & Sons— 1980—Vol. 7— P. 272.
21. Numerical Solution of Partial Difference Equations / J. Noyé // Conference on Numerical Solution of Partial Differential Equations— 1981
22. Handbook of Numerical Heat Transfer / Minkowycz W.J., Sparrow E.M. // Wiley— 1988.
23. Schweig E. Computer Analysis of Dielectric Waveguides: A Finite Difference Method / Schweig E., Bridges W.B. // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques— 1984—Vol. 32— P. 531-541.
24. Кузнецов Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007 – С. 172.
25. Крайнов А.Ю. Численные методы решения задач тепло- и массопереноса: учеб. пособие. / Крайнов А.Ю., Миньков Л.Л. – Томск: STT, 2016. – С. 92.
26. Исаченко В. П. Теплопередача: учебник для для энергетических вузов и факультетов. / Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. –Изд. 3-е, перераб. и доп М., Энергия – 1975– С. 488.
27. Krabbenhoft K., Damkilde L., Nazem M. An implicit mixed enthalpy–temperature method for phase-change problems //Heat and mass transfer. – 2007. – Vol. 43. – №. 3. – P. 233-241.
28. Bhattacharya M., Basak T., Ayappa K. G. A fixed-grid finite element based enthalpy formulation for generalized phase change problems: role of superficial mushy region //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2002. – Vol. 45. – №. 24. – P. 4881-4898.
29. Cao Y., Faghri A., Chang W. S. A numerical analysis of Stefan problems for generalized multi-dimensional phase-change structures using the enthalpy transforming model //International journal of heat and mass transfer. – 1989. – Vol. 32. – №. 7. – P. 1289-1298.

30. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 25.02.2022).
31. Федеральный закон от 28.12.2013 N 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда» (ред. от 30.12.2020).
32. ГОСТ 12.2.032-78 «Рабочее место при выполнении работ сидя».
33. ГОСТ 12.0.003 – 2015 ССБТ. «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».
34. ТК РФ Статья 351.6. «Особенности регулирования труда работников в сфере электроэнергетики, сфере теплоснабжения, в области промышленной безопасности, области безопасности гидротехнических сооружений».
35. Р 2.2.2006–05. «Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда».
36. СП 52.13330.2016. «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий».
37. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
38. Правила устройства электроустановок. ПУЭ-2009. Харьков: ОООФорт, 2010. – С. 704.
39. Федеральный закон от 22.07.2008 N 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (ред. от 30.04.2021).
40. СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности».
41. Постановление правительства от 31 декабря 2020 года № 2398 «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий».