

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа информационных технологий и робототехники
Направление подготовки 01.04.02 «Информатика и вычислительная техника»
Отделение школы (НОЦ) информационных технологий

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Математическое моделирование нестационарных температурных полей в титановой мишени при импульсном воздействии потока энергии

УДК 519.876:536.21-3:669.295

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8БМ71	Федорова Евгения Николаевна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор отделения информационных технологий	Коваль Тамара Васильевна	Доктор физико-математических наук		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент отделения социально-гуманитарных наук	Меньшикова Екатерина Валентиновна	Кандидат философских наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент отделения общетехнических дисциплин	Алексеев Николай Архипович			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор отделения информационных технологий	Коваль Тамара Васильевна	Доктор физико-математических наук		

Томск – 2019 г.

Планируемые результаты обучения по направлению подготовки

01.04.02 Прикладная математика и информатика

Код подразделения	Результат обучения
1	2
Общекультурные компетенции	
ОК-1	Способность к абстрактному мышлению, анализу, синтезу.
ОК-2	Готовность действовать в нестандартных ситуациях, нести социальную и этическую ответственность за принятые решения.
ОК-3	Готовность к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала.
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК-1	Готовность к коммуникации в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном языке для решения задач профессиональной деятельности.
ОПК-2	Готовность руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия.
ОПК-3	Способность самостоятельно приобретать с помощью информационных технологий и использовать в практической деятельности новые знания и умения, в том числе, в новых областях знаний, непосредственно не связанных со сферой деятельности, расширять и углублять свое научное мировоззрение.
ОПК-4	Способность использовать и применять углубленные знания в области прикладной математики и информатики.
ОПК-5	Способность использовать углубленные знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности, при разработке и осуществлении социально значимых проектов.
Профессиональные компетенции	
ПК-1	Способность проводить научные исследования и получать новые научные и прикладные результаты самостоятельно и в составе научного коллектива.
ПК-2	Способность разрабатывать концептуальные и теоретические модели решаемых научных проблем и задач.

ПК-3	Способность углубленного анализа проблем, постановки и обоснования задач научной и проектно-технологической деятельности.
ПК-4	Способность разрабатывать концептуальные и теоретические модели решаемых задач проектной и производственнотехнологической деятельности.
ПК-5	Способность управлять проектами, планировать научноисследовательскую деятельность, анализировать риски, управлять командой проекта.
ПК-6	Способность организовывать процессы корпоративного обучения на основе технологий и развития корпоративных баз знаний.
ПК-7	Способность разрабатывать и оптимизировать бизнес-планы научно-прикладных проектов.
ПК-8	Способность разрабатывать корпоративные стандарты и профили функциональной стандартизации приложений, систем, информационной инфраструктуры.
ПК-9	Способность к преподаванию математических дисциплин и информатики в образовательных организациях основного общего, среднего общего, среднего профессионального и высшего образования.
ПК-10	Способность разрабатывать учебно-методические комплексы для электронного и мобильного обучения.
ПК-11	Способность разрабатывать аналитические обзоры состояния области прикладной математики и информационных технологий.
ПК-12	Способность к взаимодействию в рамках международных проектов и сетевых сообществ.
ПК-13	Способность осознавать корпоративную политику в области повышения социальной ответственности бизнеса перед обществом, принимать участие в ее развитии.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа информационных технологий и робототехники
Направление подготовки 01.04.02 «Информатика и вычислительная техника»
Отделение школы (НОЦ) информационных технологий

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ Коваль Т.В.

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
8БМ71	Федорова Евгения Николаевна

Тема работы:

Математическое моделирование нестационарных температурных полей в титановой мишени при импульсном воздействии потока энергии	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

Результаты экспериментального измерения температуры поверхности титана, теплофизические параметры.

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов

Цель работы - исследование температуры титана от формы импульса плотности мощности воздействия и от параметров пучка.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить методы решения уравнения нестационарного теплопроводности;
- сравнение и выбор метода математического описания фазового перехода;
- проведение численных расчетов и сравнение с экспериментом.

Перечень графического материала

- сравнение с тестовой задачей;
- сравнение различных методов вычисления температуры титана с учетом фазового перехода;
- сравнение численных расчетов с экспериментальными измерениями.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Меньшикова Екатерина Валентиновна, кандидат философских наук, профессор отделение общетехнических дисциплин
Социальная ответственность	Алексеев Николай Архипович, ассистент отделения общетехнических дисциплин
Иностранный язык	Сидоренко Татьяна Валерьевна, кандидат педагогических наук, доцент отделения иностранных языков
Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:	
Моделирование импульсного высокоскоростного воздействия электронного пучка на титан	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор отделения информационных технологий	Коваль Тамара Васильевна	Доктор физико-математических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8БМ71	Федорова Евгения Николаевна		

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

Студенту:

Группа	ФИО
8БМ71	Федоровой Евгении Николаевне

Школа	ИШИТР	Отделение школы (НОЦ)	Информационных технологий
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	01.04.02 Прикладная математика и информатика

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	– Зарплата (руководителя 47104 руб. в месяц, магистра 12664 руб. в месяц) – Бюджет затрат НИИ 190926 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Тариф на электроэнергию – 5.8 руб. за 1 кВт·ч
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	– Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 27.1 %; – Районный коэффициент – 1,3; – Коэффициент накладных расходов – 30%.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ	– Сравнение с другими схожими материалами
2. Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет	– Иерархическая структура работ; – SWOT-анализ; – определение трудоемкости работ.
3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Бюджет научно-технического исследования: – расчет материальных затрат; – расчет основной платы исполнителей темы; – накладные расходы; – формирование бюджета затрат.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Диаграмма Исикавы
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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН	Меньшикова Е.В.	к.ф.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8БМ71	Федорова Евгения Николаевна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8БМ71	Федоровой Евгении Николаевне

Школа	ИШИТР	Отделение (НОЦ)	Информационных технологий
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	01.04.02 Прикладная математика и информатика

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
Характеристика объекта исследования (вещество, материал, рабочая зона) и области его применения	Математическое моделирование нестационарных температурных полей в титановой мишени при импульсном воздействии потока энергии
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	1. Специальные правовые нормы трудового законодательства; 2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.
2. Производственная безопасность 2.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения 2.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения	Вредные факторы: 1. Отклонения показателей микроклимата; 2. Недостаточная освещенность рабочей зоны; 3. Превышение уровня шума; 4. Повышенный уровень электромагнитных излучений; Опасные факторы: 1. Электрический ток 2. Опасность возникновения пожара
3. Экологическая безопасность	Источники выбросов в атмосферу; Образование сточных вод и отходов. Мероприятия по снижению вредного воздействия на ОС
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	Вероятные ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения и меры по их предупреждению
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД ШБИП	Алексеев Н.А.	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8БМ71	Федорова Евгения Николаевна		

Реферат

Выпускная квалификационная работа магистра содержит 94 страницы, 19 рисунков, 19 таблиц, 24 источник, 1 приложение.

Ключевые слова: титан, электронно-пучковая импульсная обработка, уравнение теплопроводности, фазовые переходы.

Актуальность выбранной темы связана с решением вопроса управления высокоскоростным воздействием электронного пучка на материалы с целью модификации поверхностных слоев.

Работа посвящена методам отражения энергетических и температурных полей в титановой мишени при импульсно-пучковой обработке.

Целью работы является исследование температуры титана от формы импульса плотности мощности воздействия и от параметров пучка.

Магистерская работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word, численное моделирование проводилось с использованием высокоуровневого языка и интерактивной среды MATLAB.

Оглавление

Введение.....	11
I. Уравнение теплопроводности.....	13
1.1 Задача Стефана. Решение задачи о распространении тепла	13
1.2 Нестационарное уравнение теплопроводности	14
1.3 Аналитическое решение одномерного уравнения теплопроводности	15
1.4 Уравнение теплопроводности с учетом зависимости теплофизических коэффициентов от температуры и фазовых переходов	18
1.5 Численные методы решения нестационарной задачи теплопроводности	21
1.6 Решение уравнения теплопроводности в среде Matlab.....	23
1.7 Тестовая задача. Решение задачи теплопроводности без учета зависимости теплофизических коэффициентов от температуры	25
II. Влияние фронта плотности мощности на температурное поле.....	27
III. Моделирование импульсного высокоскоростного воздействия электронного пучка на титан	31
3.1 Измерения температуры поверхности металлов в импульсе высокоскоростного воздействия электронного пучка	31
3.2 Программы. Параметры численного эксперимента	33
3.3 Сравнение методов численной реализации фазового перехода	34
3.4 Сравнение численных методов с экспериментальными данными ..	38
IV. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	43
4.1 Потенциальные потребители результатов	43

4.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	44
4.3 SWOT – анализ.....	46
4.4 Инициация проекта.....	47
4.5 План проекта	50
4.6 Бюджет научного исследования.....	52
4.7 Основная заработная плата исполнителей темы	54
4.8 Реестр рисков	58
4.9 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	59
V. Социальная ответственность.....	63
5.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	63
5.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов	64
5.3 Выводы и рекомендации	82
Заключение	83
Список литературы	84
Приложение А	88

Введение

Взаимодействие пучков заряженных частиц (электронов и ионов разных видов) изучается параллельно с разработкой и совершенствованием источников этих излучений. Если сначала исследовательские работы носили чисто академический характер, то в настоящее время пучки заряженных частиц достаточно широко применяются в технологических целях. Основные промышленные отрасли, которые являются потребителями этих технологий, - это машиностроение, электроника и радиоэлектроника, ядерная и космическая техника.

К современным пучковым технологиям относятся различные виды электронно-лучевой обработки (сварка, плавка и др.), синтез химических соединений с помощью пучков заряженных частиц, имплантационная металлургия, электронно- и ионно-стимулированная модификация физико-химических свойств твердых тел, нанесение пленочных покрытий. Комплекс технологий, связанных с инерционным термоядерным синтезом, также включает использование пучков заряженных частиц. Круг задач, решаемых методами электронной и ионной технологии, непрерывно расширяется, и эта тенденция, несомненно, сохранится в будущем [1-4].

Механические и эксплуатационные свойства материалов во многом определяются режимом электронно-пучкового воздействия, а также такими характеристиками материала, как величина максимальной температуры нагрева, термический цикл, скорости плавления и кристаллизации. Поэтому измерение температуры поверхности при высокоскоростном воздействии электронного пучка открывает возможности, как изучения процессов нагрева, плавления, испарения материалов, так и управления технологическими параметрами модификации с целью получения заранее заданных свойств материалов после электронно-пучковой модификации.

Методика измерения импульсной температуры и использование численного моделирования тепловых полей в образце открывает возможность управления основными технологическими параметрами электронно-пучкового воздействия с целью получения заранее заданных свойств поверхности материалов.

В работе при решении нестационарного уравнения теплопроводности рассмотрены различные методы численной реализации фазового перехода при плавлении и кристаллизации, исследуется влияние на температуру поверхности титана конфигурации импульса плотности мощности и длительности его фронта, приводится сравнение экспериментальной температуры поверхности титана в импульсе (100 мкс) высокоскоростного воздействия электронного пучка (плотность энергии 10...25 Дж/см²) [5] и расчетной температуры.

I. Уравнение теплопроводности

1.1. Задача Стефана. Решение задачи о распространении тепла

Для случаев, когда тепловой энергии, внесенной в вещество, достаточно, чтобы оно нагрелось до температур плавления и кипения, разработан специальный подход решения, рассматривающий затраты тепла на фазовые переходы. Задачи о распространении тепла с учетом фазовых переходов называется задачей Стефана [6].

Учет фазовых переходов производится следующим образом. Для границы раздела фаз жидкость – твердое тело записываются специальные граничные условия, обеспечивающие выполнение условия равенства потоков тепла с учетом его потерь на фазовые превращения:

$$\lambda \frac{\partial T(z_m - 0, t)}{\partial x} - \lambda \frac{\partial T(z_m + 0, t)}{\partial x} = q_m \rho \frac{\partial z_m}{\partial t} \quad (1.1.1)$$

где q_m – удельная теплота плавления. Скорость движения фазовой границы Z_m определяется потоком тепла, поглощаемым или выделяемым на этой границе из-за объемной теплоты фазового перехода $q_m \rho$.

Кроме соотношения (1.1.1) на межфазной границе создается еще одно условие, связанное с кинетикой фазового перехода. В начале плавления или затвердевания обычно принимается, что на границе раздела фаз температура непрерывна и равна равновесной температуре перехода T_m , которую во многих случаях можно считать постоянной величиной. Изменение T_m может быть обусловлено, например, изменением внешнего давления или вариацией свойств веществ вдоль направления распространения фронта перехода. Рассмотренная задача носит название задачи Стефана.

В рамках задачи Стефана эволюция температурного профиля и скорости фронта перехода исключает возможность перегрева твердой фазы выше температуры плавления или переохлаждения жидкой фазы, т.е. возникновения

метастабильных состояний, а также объемного плавления перегретого образца. Корректное математическое моделирование таких физических ситуаций требует привлечение более сложных методов. Надо отметить, однако, что в целом проблема возникновения и развития метастабильных состояний еще недостаточно изучена [6].

Граничное условие, учитывающее испарение на поверхности облучаемого образца, записывается аналогично (1.1.1). Далее мы рассмотрим вопрос об испарении более подробно и поэтому, сейчас на нем не будем останавливаться. Отметим лишь факт, что потерями тепла в результате излучения через свободную поверхность ε_T ($\varepsilon_T = \sigma T^4$, где σ - универсальная постоянная Стефана-Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²град⁴) в расчетах обычно пренебрегают, так как даже при температуре кипения поток энергии теплового излучения с конденсированной поверхности не превышает 10^5 Вт/м², тогда как поток, обусловленный теплопроводностью, составляет $10^{11} - 10^{12}$ Вт/м².

1.2. Нестационарное уравнение теплопроводности

Дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье-Кирхгофа в случае неподвижной среды и отсутствия внутренних источников тепла имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T \quad (1.2.1)$$

где $a = \lambda / c\rho$ и ∇^2 - оператор Лапласа, записанный в прямоугольной, цилиндрической, сферической или иной системах координат. Это уравнение устанавливает зависимость между температурой, временем и координатами тела в элементарном объеме, т.е. связывает временные и пространственные изменения температуры тела.

Если заданы форма и размеры тела, а также его физические свойства $(\lambda, c, \rho, \dots)$, т.е. геометрические и физические условия однозначности, то для решения уравнения (1.2.1) необходимо задать еще начальные и граничные, или краевые условия.

Поскольку температура тела в общем случае является функцией координат и времени $f(x, y, z, \tau)$, то начальные условия или распределение температур в теле в начальный момент, задаются в виде $f(x, y, z, 0) = f_0(x, y, z)$, где f_0 - известная функция, которая необязательно должна быть задана аналитически, а может быть представлена численно и графически. В ряде практических задач начальное условие имеет более простой вид:

$$f(x, y, z) = T_0 = \text{const} \quad (1.2.2)$$

Для однородных тел граничные условия могут быть заданы трех видов: температура любой точки поверхности тела в любой момент времени; тепловой поток у поверхности, либо температура среды, омывающей тело; условие теплообмена тела с окружающей средой. В отличие от стационарных задач все величины, входящие в граничные условия, могут изменяться во времени по заданному закону.

1.3. Аналитическое решение одномерного уравнения теплопроводности

Дифференциальное уравнение теплопроводности имеет вид [7]

$$u_t = a^2 u_{xx}, \quad 0 < x < 1, \quad 0 < t < T, \quad (1.3.1)$$

$$u(0, t) = u(l, t) = 0, \quad 0 \leq t \leq T,$$

$$u(x, 0) = \varphi(x), \quad 0 \leq x \leq 1.$$

Требуется найти функцию $u(x, t)$ для $\forall (x, t): \begin{cases} 0 \leq x \leq 1 \\ 0 \leq t \leq T \end{cases}$.

Представим искомую функцию в виде произведения

$$u(x, t) = X(x)T(t).$$

Затем предполагаемую форму решения подставим в исходное уравнение, получим

$$X(x)T(t) = a^2 X''(x)T(t).$$

После некоторых преобразований получим два обыкновенных дифференциальных линейных дифференциальных уравнения:

$$\begin{cases} X''(x) + \lambda X(x) = 0 \\ T'(t) + a^2 \lambda T(t) = 0 \end{cases}.$$

Обратим внимание на граничные условия исходной задачи и подставим в них предполагаемый вид уравнения, получим:

$$\begin{cases} u(t, 0) = X(0)T(t) = 0 \\ u(l, t) = X(l)T(t) = 0 \end{cases}.$$

Откуда $X(0) = X(l) = 0$ ($T(t) \neq 0$, т.к. в противном случае мы имели бы решение $u(x, t) = 0$, а мы ищем только нетривиальные решения). С учетом полученных граничных условий мы получаем задачу Штурма-Лиувилля:

$$\begin{cases} X''(x) + \lambda X(x) = 0 \\ X(0) = 0 \\ X(l) = 0 \end{cases}.$$

Ее решение сводится к решению линейного дифференциального уравнения и рассмотрению трех случаев:

а. $\lambda < 0$

В этом случае общий вид решения будет следующим:

$$X(x) = C_1 e^{\sqrt{-\lambda}x} + C_2 e^{-\sqrt{-\lambda}x}. \quad (1.3.2)$$

Подставив граничные условия, мы убедимся, что решение будет $X(x) \equiv 0$.

b. $\lambda = 0$

Общий вид решения

$$X(x) = C_1 x + C_2.$$

c. $\lambda > 0$

Общий вид решения

$$X(x) = C_1 \cos(\sqrt{\lambda}x) + C_2 \sin(\sqrt{\lambda}x). \quad (1.3.3)$$

Найдем λ , подставив граничные условия

$$\lambda_n = \left(\frac{\pi n}{l}\right)^2, \quad n = 1, 2, \dots$$

Теперь с учетом найденных λ , выведем общее решение линейного дифференциального уравнения, получим

$$T_n(t) = D_n e^{-a^2 \left(\frac{\pi n}{l}\right)^2 t}, \quad D_n = \text{const.}$$

Все готово для того, чтобы записать решение исходной задачи

$$u(x, t) = X_n(x) T_n(t) = C_n \sin\left(\frac{\pi n}{l} x\right) e^{-a^2 \left(\frac{\pi n}{l}\right)^2 t}, \quad n = 1, 2, \dots$$

В результате мы получили бесконечное число частных решений уравнения. Все эти части линейно независимы. Поэтому логично предположить, что суммируя все частные решения по n от единицы до бесконечности, мы получим общее решение исходной задачи.

После некоторых преобразований получаем общее решение:

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{l} \int_0^l \varphi(\xi) \sin\left(\frac{\pi n}{l} \xi\right) d\xi \right) \sin\left(\frac{\pi n}{l} x\right) e^{-a^2 \left(\frac{\pi n}{l}\right)^2 t}. \quad (1.3.5)$$

1.4. Уравнение теплопроводности с учетом зависимости теплофизических коэффициентов от температуры и фазовых переходов

Для исследования пространственно-временной зависимости температуры и ее скорости изменения в приповерхностном слое титана рассмотрим модель:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1.4.1)$$

с граничными условиями

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = q(t) - \sigma \varepsilon (T^4 - T_s^4), \quad \lambda(t) \frac{\partial T(L, t)}{\partial x} = 0, \quad (1.4.2)$$

здесь ε – степень черноты; T_s – температура окружающей среды.

Расчетные параметры: $\rho = \rho_S = \rho_L = 6,7 \text{ г/см}^3$; $T_{ph} = 1947 \text{ К}$; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-12} \text{ Дж/(с} \cdot \text{К}^4 \cdot \text{см}^2)$; $\varepsilon = 0,1$.

Температурные зависимости теплофизических коэффициентов получены на основе обработки методом наименьших квадратов, и имеют вид:

$$\lambda(T) = 1,872 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 0,2492 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0,2743, \text{ Вт/(см} \cdot \text{с} \cdot \text{К)}, \quad T < 1500 \text{ К},$$

$$c(T) = -1,764 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 0,4635 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0,3904, \text{ Дж/(г} \cdot \text{К)}, \quad T < 1500 \text{ К}$$

При решении уравнения теплопроводности рассмотрим два метода описания фазового перехода: первый, с помощью дельтаобразной функции, второй, энтальпийный подход.

Первый метод. В окрестности температуры плавления T_{ph} эффективная теплоемкость резко возрастает, что учитывается с помощью дельтаобразной функции[8,9]:

$$(c\rho)_{eff} = Q_{ph}\rho_s\delta(T-T_{ph}) + (c\rho)_s, \quad T < T_{ph} \quad (1.4.3)$$

$$(c\rho)_{eff} = Q_{ph}\rho_s\delta(T-T_{ph}) + (c\rho)_L, \quad T \geq T_{ph}$$

где $(c\rho)_L$ и $(c\rho)_s$ – объемные теплоемкости жидкой и твердой фаз соответственно; Q_{ph} – теплота плавления.

$$\delta(T-T_{ph}) \equiv \left(\frac{1}{s\sqrt{\pi}} \right) \exp\left(-\frac{T-T_{ph}}{s^2} \right), \quad (1.4.4)$$

s – параметр сглаживания. Доза облучения, или плотность энергии, получаемой единицей поверхности за время t , определяется как $p(t) = q_0 n t_i$, где n – число импульсов; t_i и t_p – длительности импульсов и пауз.

Второй метод. Уравнение теплопроводности записывается в энтальпийной форме:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1.4.5)$$

где двухфазная задача Стефана, описывающая плавление и кристаллизацию чистых веществ, характеризуется функцией энтальпии (cT) с разрывом [6, 10], который для фазового превращения при расплаве можно записать в виде:

$$T = \begin{cases} \frac{E}{(c\rho)_S}, & E \leq E_{ph} \\ T_{ph}, & E_{ph} < E \leq E_{ph} + Q_{ph} \rho_s \\ T_{ph} + \frac{E - (E_{ph} + Q_{ph} \rho_s)}{(c\rho)_L}, & E > E_{ph} + Q_{ph} \rho_s \end{cases} \quad (1.4.6)$$

$E_{ph} = T_{ph} (c\rho)_s$ – энергия, необходимая для фазового перехода.

Начальные условия: $E(x, 0) = T_0 c_s \rho_s$.

$$\text{Граничные условия: } x = 0 : \begin{cases} \frac{-\lambda}{c\rho} \frac{\partial E}{\partial x} = q(t) \\ \frac{-\lambda}{c\rho} \frac{\partial E}{\partial x} = 0 \end{cases}.$$

В работах [11,12] фазовый переход при плавлении (испарении) материала учитывался с применением формулы:

$$d = \frac{(T - T_{ph})cs}{Q_{ph}}, \quad (1.4.7)$$

где T – температура в точке, которая идет на плавление или испарение образца, T_{ph} – температура плавления (или испарения), cs – удельная теплоёмкость твердого (или жидкого) состояния, Q_{ph} – теплота плавления (или испарения).

При достижении ячейкой температуры плавления T_{ph} ее температура фиксируется и полагается равной температуре плавления, а все подводимое тепло d (1.4.7) идет на плавление образца; $q = 1$ означает переход вещества в жидкое состояние. Процесс кристаллизации моделировался таким же образом, только значение q уменьшалось от 1 до 0. Процесс испарения и конденсации моделируется аналогичным образом.

Условие (1.4.7) может быть записано в следующем виде[11,12]:

$$0 \leq d = \frac{(T - T_{ph})cs}{Q_{ph}} \leq 1 \Leftrightarrow 0 \leq T - T_{ph} \leq \frac{Q_{ph}}{cs} \Leftrightarrow \Delta T \leq \frac{Q_{ph}}{cs}. \quad (1.4.8)$$

Для решения уравнения теплопроводности разработаны численные методы [13–16], которые основываются на конечно-разностных схемах, решаемых методом прогонки. Алгоритм с счетчиком и коррекцией [6], основанный на неявной конечно-разностной схеме, решаемой методом прогонки, позволяет учитывать энергетический баланс в фазовых превращениях (плавлении, затвердевании, испарении) и пространственное изменение теплофизических свойств композиции; отслеживать границы фазовых переходов и долгие процессы распространения тепла; описывать с хорошей степенью точности, заданной пользователем, объемный источник энерговыделения. Этот алгоритм включает в себе величину Q_{t_n} , необходимую для коррекции значений температур при фазовых переходах, счетчики теплоты фазовых переходов Q_{tr_n} (в единицах температуры) и переменные S_n , указывающие, в каком из фазовых состояний находится данная точка; Q_{t_n} и Q_{tr_n} действительны только во время фазового перехода, а S_n принимает значения «до перехода», «переход», «после перехода» [8].

1.5. Численные методы решения нестационарной задачи теплопроводности

Рассмотрим уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0, \quad a - const > 0 \quad (1.5.1)$$

Для численных решений данного уравнения существуют разные схемы вычисления. Ниже приведены некоторые схемы, наиболее распространенные на практике [13–16].

Явная схема.

Частные производные в уравнении теплопроводности заменяются разностными формулами:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\tau}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{T_i^{n+1} - 2T_i^n + T_{i-1}^{n+1}}{h^2}.$$

В результате получаем:

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\tau} - a \frac{T_i^{n+1} - 2T_i^n + T_{i-1}^{n+1}}{h^2} = 0$$

решение уравнения на каждом последующем слое вычисляется по рекуррентной формуле

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \frac{\tau a}{h^2} (T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n).$$

Полученная схема является устойчивой при $\tau \leq h^2 / 2a$, схема условно сходится.

Неявная схема.

Уравнение теплопроводности (1.5.1) преобразуется путем замены производных разностными формулами на $n+1$ слое. В результате получаем неявную схему:

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\tau} - a \frac{T_{i+1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{h^2} = 0.$$

Полученная схема является устойчивой. Погрешность аппроксимации и сходимость неявной схемы $O(\tau, h^2)$. Сходимость по временной переменной – первого порядка. Следующая схема будет обеспечивать сходимость второго порядка по времени.

Схема с перешагиванием.

$$T_i^{n+1} = T_i^{n-1} + \frac{2\tau a}{h^2} (T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n).$$

Эта схема аппроксимирует уравнение теплопроводности (1.5.1) с погрешностью $O(\tau^2 + h^2)$. Схема с перешагиванием является неустойчивой и непригодной в практических расчетах.

Схема Дюфора.

$$T_i^{n+1} (1 + \alpha) = (1 - \alpha) T_i^{n-1} + \alpha (T_{i+1}^n + T_{i-1}^n), \quad \alpha = \frac{2\tau a}{h^2}.$$

Данная схема устойчивая для τ и h , аппроксимирует уравнение теплопроводности с погрешностью $O(h^2 + \tau^2 + \tau^2 / h^2)$.

1.6. Решение уравнения теплопроводности в среде Matlab

Решателем уравнения теплопроводности может служить средство решения дифференциальных уравнений в частных производных PDE пакета Matlab [17].

Функция *pdepe(m, pdefun, icfun, bcfun, xmesh, tspan)* решает краевые задачи для систем параболических и эллиптических уравнений в частных производных, содержащих операции дифференцирования по временной и одно из пространственной переменным.

Функция *pdepe* решает PDE следующего вида:

$$c\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) = x^{-m} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^m f\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) \right) + s\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right)$$

В данном уравнении $f\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right)$ – функция «потока» и $s\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right)$ – функция источника. Частные производные по времени от компонентов искомой величины умножаются на диагональную матрицу $c\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right)$.

Для $t = t_0$ и всех значений x компоненты решения удовлетворяют начальным условиям вида:

$$u(x, t_0) = u_0(x).$$

Для всех t , а также $x = a$ или $x = b$ компоненты решения удовлетворяют граничному условию:

$$p(x, t, u) + q(x, t) f\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) = 0.$$

Синтаксис:

```
sol = pdepe(m, @pdefun, @icfun, @bcfun, xmesh, tspan),
```

где

- m – параметр, соответствующий симметрии: $m=0$ – «плоская» симметрия, $m=1$ – цилиндрическая симметрия, $m=2$ – сферическая симметрия;
- `@pdefun` – указатель на функцию задания коэффициентов PDE;
- `@icfun` – указатель на функцию задания начальных условий;
- `@bcfun` – указатель на функцию задания граничных условий;
- `xmesh` – вектор $[x_0, x_1, \dots, x_n]$, задающий координаты x точек, в которых численное решение требуется для каждого значения в `tspan`.
- `tspan` – вектор $[t_0, t_1, \dots, t_n]$, задающий моменты времени, в которых решение PDE требуется для каждого значения в `xmesh`.

1.7. Тестовая задача. Решение задачи теплопроводности без учета зависимости теплофизических коэффициентов от температуры

При постоянных физических коэффициентах, уравнение теплопроводности имеет вид:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x},$$

граничные и начальные условия:

$$\lambda \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = -q(t), \quad \lambda \frac{\partial T(L,t)}{\partial x} = 0,$$

$$T(x,0) = T_0 = 300\text{K},$$

теплофизические коэффициенты: $\lambda = 0,2 \text{ Вт}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{K})$, $c = 0,652 \text{ Дж}/(\text{г} \cdot \text{K})$,
 $\rho = \rho_s = \rho_L = 6,7 \text{ г}/\text{см}^3$.

Для решения этой задачи был реализован встроенный метод Pdepe пакета Matlab. В результате были получены решения, выражающие температуру поверхности образца при воздействии одиночного импульса с длительностью 100 мкс и плотностью мощности $q_0 = 2 \cdot 10^5 \text{ Вт}/\text{см}^2$.

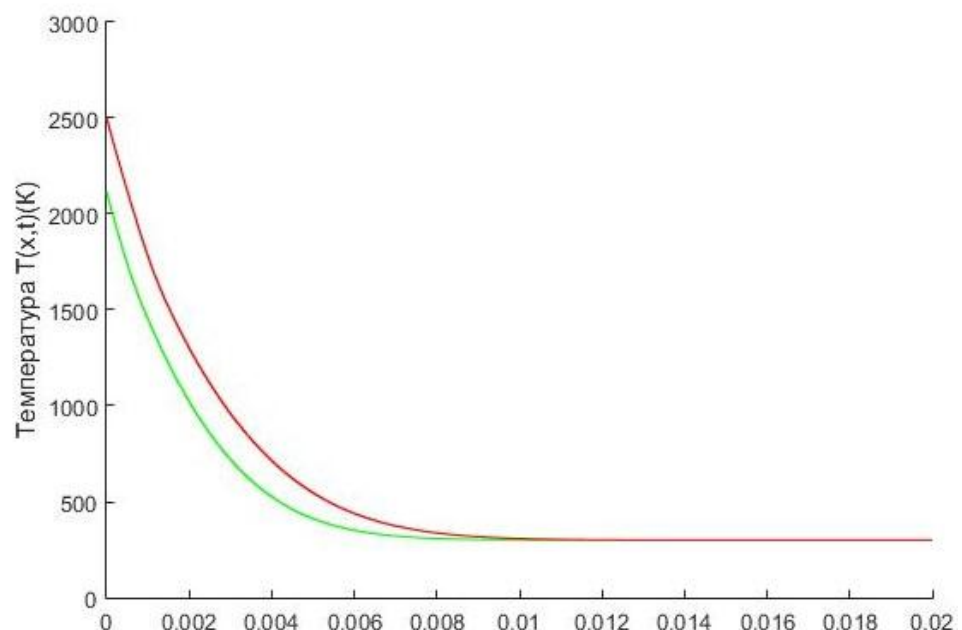


Рис. 1. Распределение температуры по глубине образца: зеленая линия – $t = 50$, красная линия – $t = 100$ мкс

Для проверки правильности вычисления температуры используем аналитическое решение [18], которое записывается приближенно в виде:

$$T(x,t) = \left(\frac{2q_0\sqrt{at}}{\lambda} \right) * \frac{1}{\pi} \operatorname{ierfc} \left[\frac{-x^2}{2\sqrt{at}} \right],$$

где $q_0 = 2 \cdot 10^5$ Вт/см² – плотность потока, $a = \frac{\lambda}{c\rho} = 2,934$ Вт/м·К – коэффициент температуропроводности.

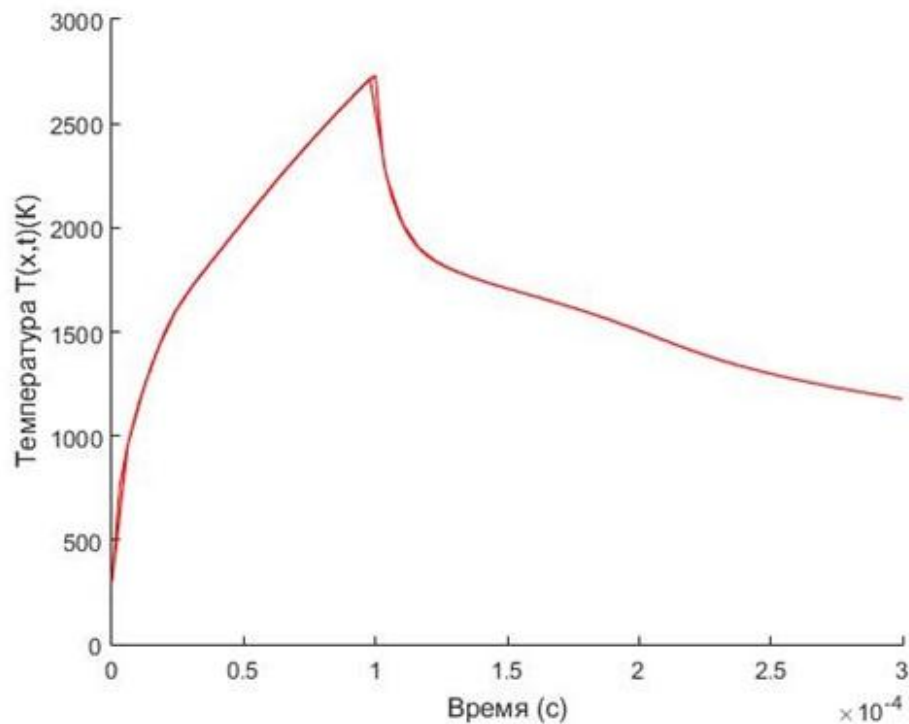


Рис.2. Сравнение аналитического решения уравнения и решения рдере в пакете Matlab

По рисункам 1 и 2 видно, что решатель рдере пакета Matlab считает уравнение теплопроводности корректно.

II. Влияние фронта плотности мощности на температурное поле

Рассмотрим влияние конфигурации плотности мощности воздействия на скорость нагрева и распределение температуры по глубине титанового образца. Решим уравнение теплопроводности при постоянных теплофизических коэффициентах. Рассмотрим прямоугольную, трапециевидную и треугольную формы импульсов, длительности фронта плотности мощности воздействия: $t_{fr} = 0, 15$ и 25 мкс при сохранении полной плотности энергии $E = 8$ Дж/см².

Для прямоугольного импульса плотности мощности (рис. 3а) длительность импульса $\tau = 100$ мкс. Плотность мощности $p_0 = E / \tau = 8 \text{ Дж/см}^2 / (100 \cdot 10^{-6} \text{ с}) = 8 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$.

На рис. 3б показан импульс в виде трапеции, где средняя длительность импульса $p_0/2$ (длительность на полувисоте импульса) определяется из условия средней линии трапеции.

Так как $E = p_0(t_{fr} + x)$, а E и p_0 не изменяются, то $x = (100 - t_{fr}) \cdot 10^{-6} \text{ с}$, то $\tau = [x + (x + 2 t_{fr})] / 2 = x + t_{fr}$.

При длительности фронта $t_{fr} = 15$ мкс верхняя полочка импульса равна $\tau = 85$ мкс, а при $t_{fr} = 25$ мкс соответственно $\tau = 75$ мкс.

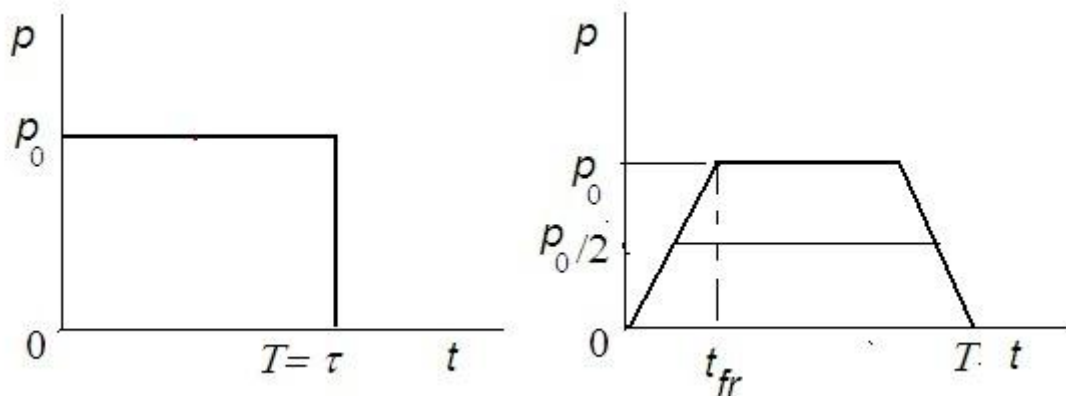


Рис. 3. Импульсы плотности мощности: (а) – прямоугольник, (б) – трапеция

Треугольная форма импульса показана на рис. 4.

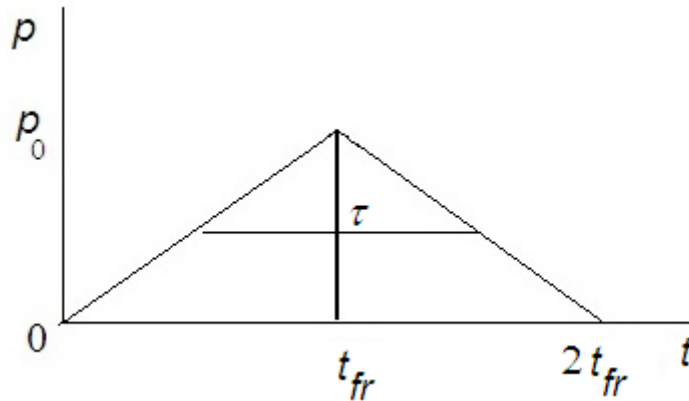


Рис. 4. Треугольная форма импульса

Для треугольного импульса при сохранении плотности энергии $E=8$ Дж/см², и заданных фронтах 15 и 25 мкс, плотность мощности p_0 зависит от длительности фронта.

Плотность мощности для импульса в форме треугольника (рис. 4) представляется в виде:

$$p = p_0(t_{fr}) \begin{cases} t/t_{fr}, & 0 < t < t_{fr}, \\ (1 - t/(\tau + 2t_{fr})) \cdot ((\tau + 2t_{fr})/t_{fr}), & t_{fr} < t < 2t_{fr}, \\ 0, & t > 2t_{fr}. \end{cases}$$

Для трапециевидного импульса (рис. 3б) при $t_{fr} = 15$ мкс и $t_{fr} = 25$ мкс:

$$p = p_0(t_{fr}) \begin{cases} t/t_{fr}, & 0 < t < t_{fr}, \\ 1, & t_{fr} < t < t_{fr} + x, \\ (1 - t/(\tau + 2t_{fr})) \cdot ((\tau + 2t_{fr})/t_{fr}), & t_{fr} + x < t < 2t_{fr} + x, \\ 0, & t > 2t_{fr} + x. \end{cases}$$

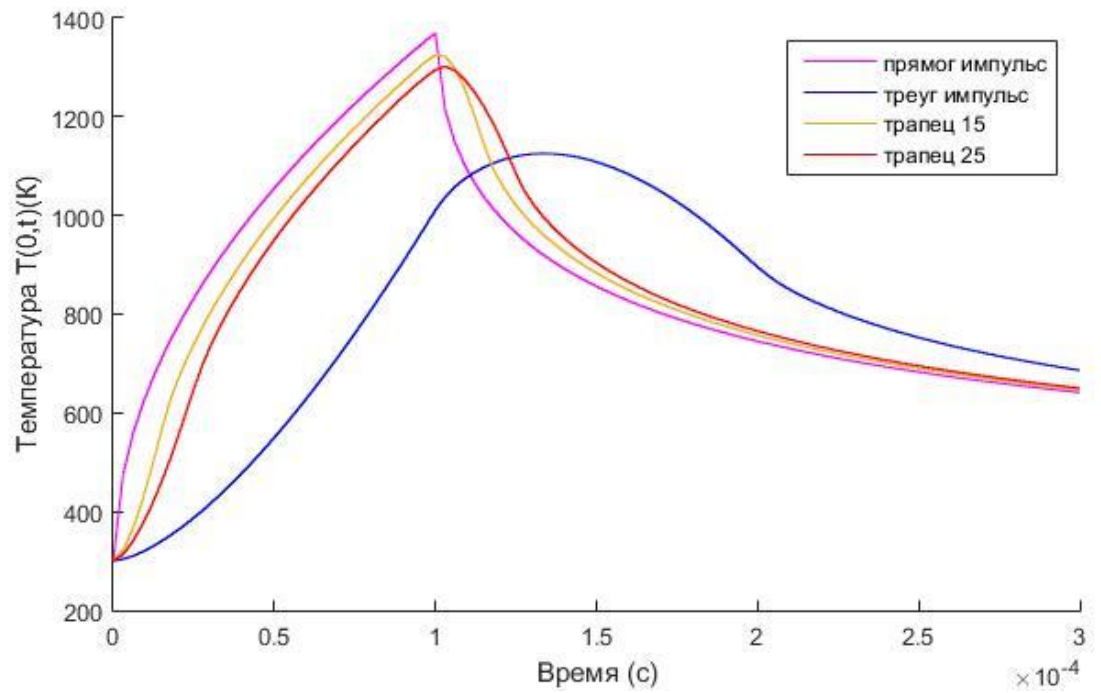


Рис. 5. Температура поверхности титанового образца для разной формы импульсов плотности мощности: розовая линия – прямоугольный импульс, желтая и красная линии – трапецевидный импульс с $\tau_{fr} = 15; 25$ соответственно, синяя линия – треугольный импульс.

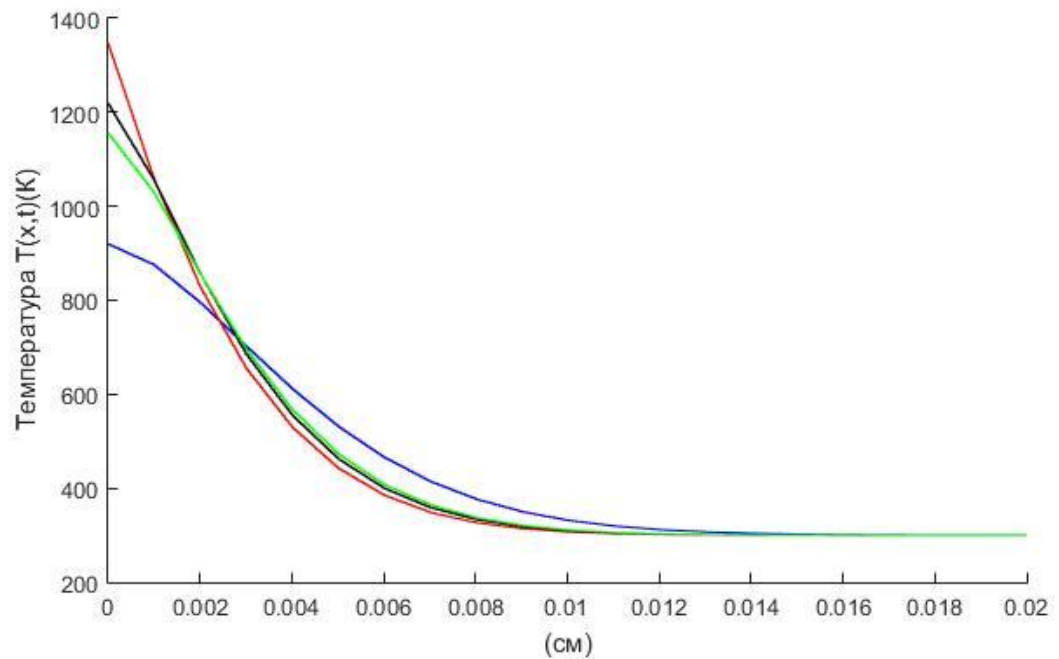


Рис.6. Распределение температуры по глубине образца в конце импульса воздействия: синяя линия – треугольный импульс, красная линия –

прямоугольный импульс, черная и зеленая линии – трапециевидный импульс с $\tau_{fr} = 15; 25$ соответственно.

Из рис. 5 видно, что с увеличением фронта плотности мощности воздействия температура поверхности уменьшается, то есть скорость нагрева образца уменьшается.

Из рис. 6 видно, что глубина нагрева при увеличении фронта плотности мощности увеличивается за счет увеличения длительности воздействия.

III. Моделирование импульсного высокоскоростного воздействия электронного пучка на титан

3.1. Измерения температуры поверхности металлов в импульсе высокоскоростного воздействия электронного пучка

Импульсная электронно-пучковая установка «СОЛО», разработанная и изготовленная в Институте сильноточной электроники СО РАН, используется для модификации поверхности различных материалов и изделий [19]. В её основе лежит электронный источник с плазменным катодом на основе импульсного дугового разряда низкого давления [20], способный генерировать импульсный электронный пучок с длительностью импульса 20 – 200 мкс, током 20 – 300 А, энергией электронов 5 – 25 кэВ, плотностью энергии в импульсе до 100 импульсов $0.3 - 20 \text{ с}^{-1}$. Воздействие импульсного электронного пучка на поверхность металлического материала позволяет достигать скоростей нагрева поверхностного слоя – 10^8 К/с , охлаждения – $10^6 - 10^7 \text{ К/с}$, что ведет к выглаживанию поверхности, импульсной закалке из расплавленного состояния и, как следствие, к существенному улучшению физико-химических и эксплуатационных свойств материалов и изделий в целом.

В эксперименте [5] в качестве материала для импульсных температурных измерений использовался образец из технически чистого титана ВТ1-0 размерами $12 \times 12 \times 4 \text{ мм}$ с температурой плавления $1668 \text{ }^\circ\text{С}$ фиксировался на поверхности стола-манипулятора (рис.7). Образец помещался в вакуумную камеру импульсной электронно-пучковой установки «СОЛО». Для перемещения образцов внутри камеры и позиционирования под пучком использовался программируемый манипулятор.

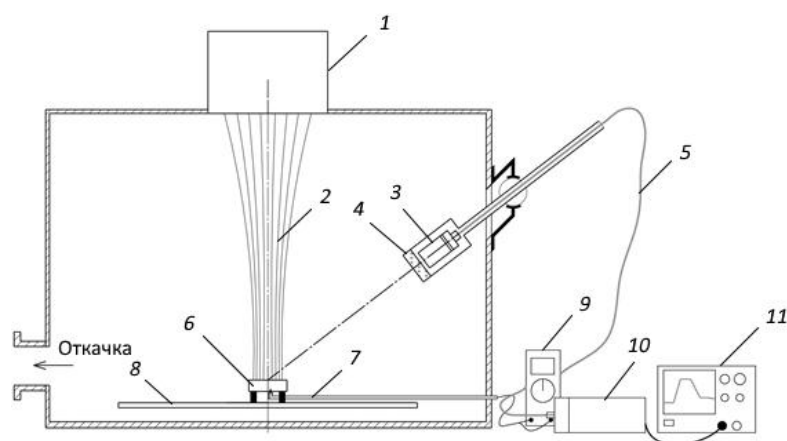


Рис.7. Схема импульсного измерения температуры поверхности титанового образца после электронно-пучкового воздействия. 1 – электронный источник; 2 – импульсный электронный пучок; 3 – объектив ; 4 – кварцевое стекло; 5 – оптический волновод; 6 – облучаемый образец; 7 – термопара; 8 – стол манипулятора; 9 – мультиметр; 10 – высокоскоростной инфракрасный; 11 – осциллограф[5]

Характерные импульсы тока имеют форму трапеции с фронтами 25 мкс, длительностью 100 мкс на полувысоте, при ускоряющем напряжении 13 кВ. На рис. 8 показаны типичные осциллограммы токов разряда и электронного пучка и температуры поверхности образца.

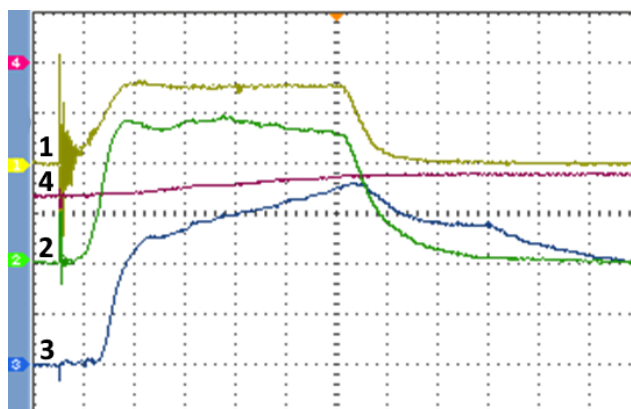


Рис.8. Осциллограммы токов разряда (1) и электронного пучка (2) (40 А/дел.), ускоряющего напряжения (4) (5 кВ/дел.) и температуры поверхности образца (3) (2 В/дел.)[2]

Распределение плотности энергии на коллекторе, снятое с помощью секционированного калориметра для тока пучка 40, 75 и 105 А, показано на рис. 9.

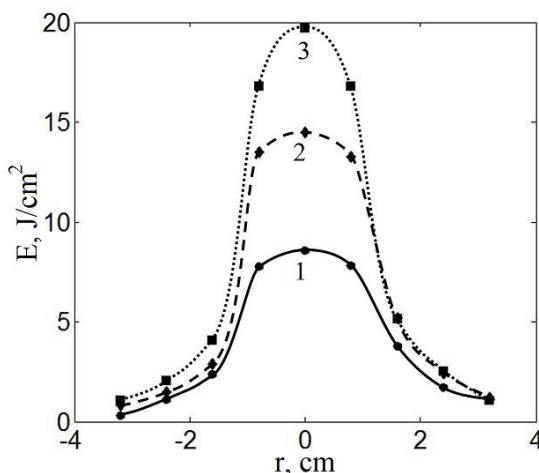


Рис.9. Распределение плотности энергии электронного пучка по сечению у поверхности образца; 1 – $E=8$ Дж/см²; 2 – $E=15$ Дж/см² 3 – $E=20$ Дж/см²

3.2. Программы. Параметры численного эксперимента

Тепловые процессы в титане, обрабатываемом интенсивным низкоэнергетическим электронным пучком, описываются уравнением теплопроводности (1.4.1), с учетом фазового перехода и граничных условий на поверхности образца (1.4.2).

Численное решение уравнения теплопроводности осуществлялось методом прогонки, а также с использованием pde-решателя в пакете MATLAB. Для реализации методов описания фазового перехода (I глава, п. 1.4), использовались 4 программы.

Программа №1: решение задачи теплопроводности с учетом фазового перехода (с помощью дельта-функции) двумя методами: решателем pde-Matlab и методом прогонки.

Программа №2: решение задачи теплопроводности с учетом фазового перехода (энтальпийная форма уравнения теплопроводности (1.4.5)-(1.4.6)) двумя методами: решателем pde-Matlab и методом прогонки.

Программа №3: решение задачи теплопроводности с учетом фазового перехода (со счетчиком и коррекцией) методом прогонки.

Программ №4: решение задачи теплопроводности по формуле (1.4.7) двумя методами: решателем pde-Matlab и методом прогонки.

Численное решение задачи производилось для следующих теплофизических значений титана: коэффициент теплопроводности $\lambda = 22,3$ Вт/(м·К), удельная теплоемкость $c = 680$ Дж/(кг·К), плотность $\rho = 6,7$ г/см³, температура плавления 1941 К, температура испарения 3533 К, теплота плавления $q_{пл} = 358$ кДж/кг, теплота испарения $q_{исп} = 8970$ кДж/кг.

3.3. Сравнение методов численной реализации фазового перехода

Введем обозначения методов численных решений:

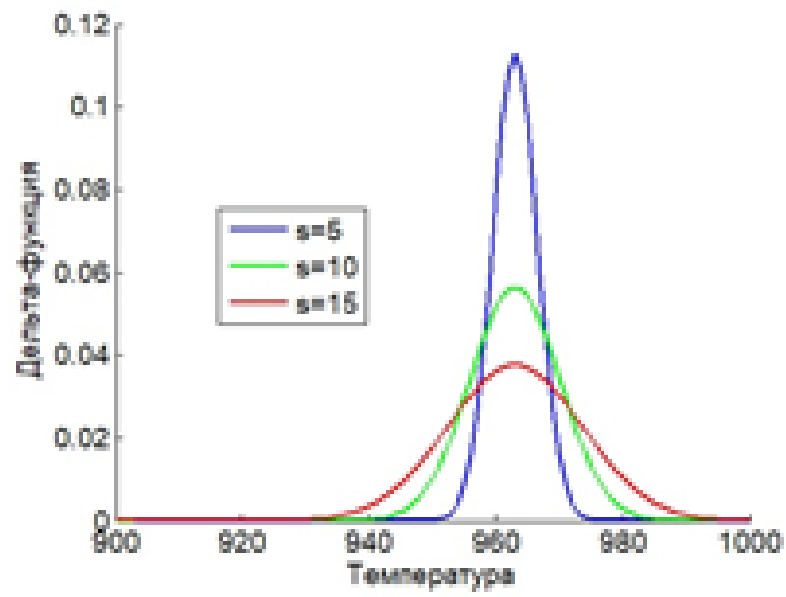
D Matlab и D Пр – метод с дельтаобразной функцией (1.4.3 – 1.4.4) решателем pde_Matlab и с помощью прогонки;

E Matlab (1) и E Пр – энтальпийный подход (1.4.5 – 1.4.6) решателем pde_Matlab и с помощью прогонки;

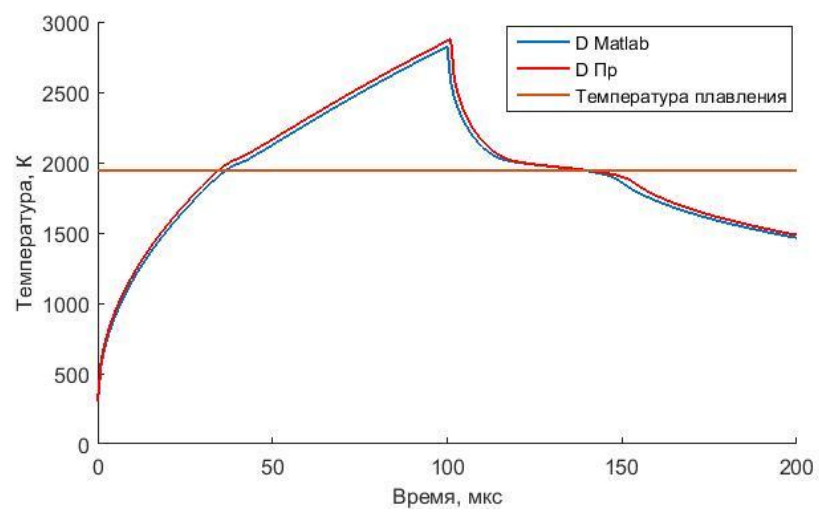
E Matlab (2) – энтальпийном подход (1.4.7 – 1.4.8);

E Matlab (счетчик и коррекция) – энтальпийный подход со счетчиком и коррекцией (с использованием [6]).

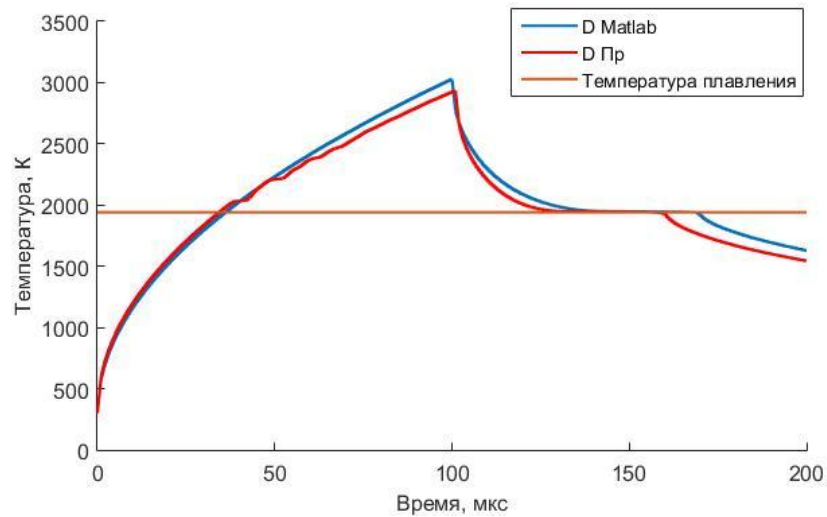
Проведем исследование влияния параметра сглаживания s в дельтаобразной функции (1.4.4) на фазовый переход. На рис. 10а показана дельтаобразная функция (1.4.1) для разных значений параметра s . С уменьшением s уменьшается ширина функции (1.4.4). Это означает, что уменьшается диапазон температур в окрестности температуры плавления, в котором эффективная теплоемкость возрастает при плавлении (уменьшается при кристаллизации). На рис. 10 б, в показана температура поверхности титана при $s = 50$ и 5.



a



б



б

Рис. 10. Дельтаобразная функция (а), изменение температуры поверхности образца титана (б, в); $a - s = 50$, $б - s = 5$

Из рисунка видно, что, чем больше параметр сглаживания s , тем меньше полочка фазового перехода при кристаллизации.

Рассмотрим вычисление температуры поверхности при разных методах вычисления фазового перехода. На рис. 11 показана температура поверхности образца титана решателем pde-Matlab. Кроме похода E_Matlab со счетчиком и коррекцией, этот поход решается прогонкой; плотность энергии $E_0 = 20$ Дж/см², длительность импульса $t_0 = 100$ мкс. На рис. 12 показано изменение температуры поверхности образца титана методом прогонки.

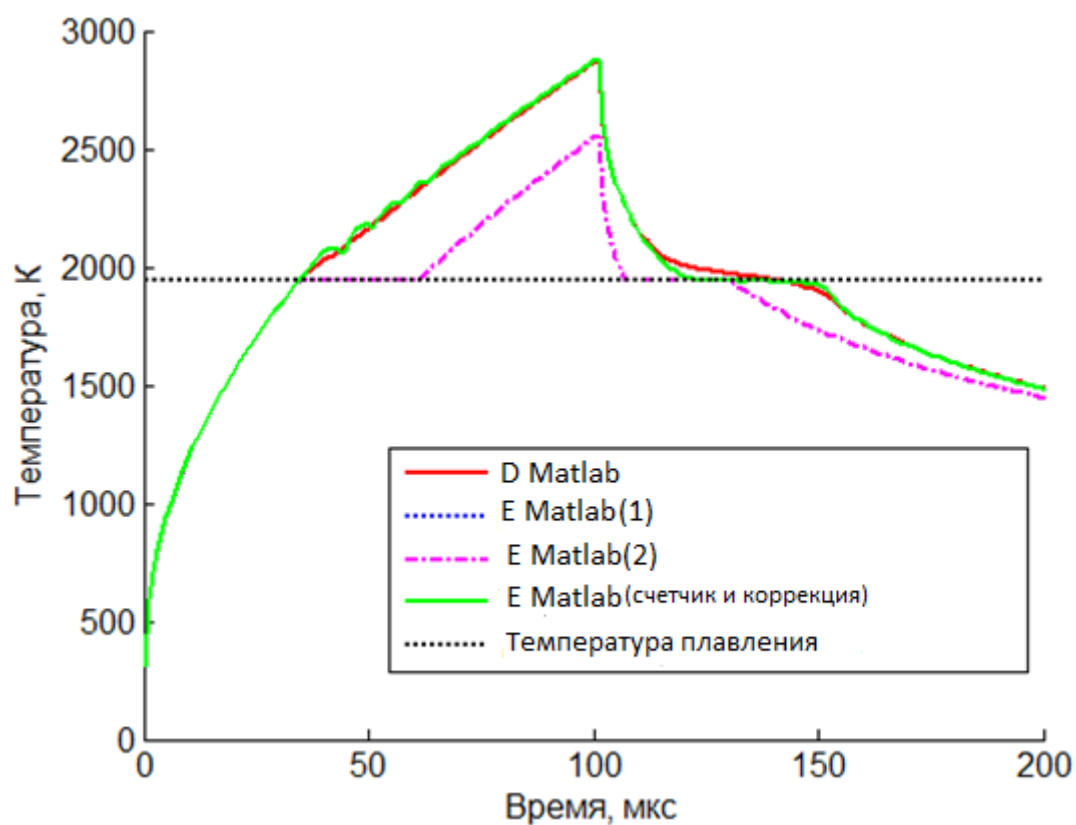


Рис. 11. Температура поверхности образца титана решателем **pde-Matlab**; $E_0=20$ Дж/см², $t_0=100$ мкс

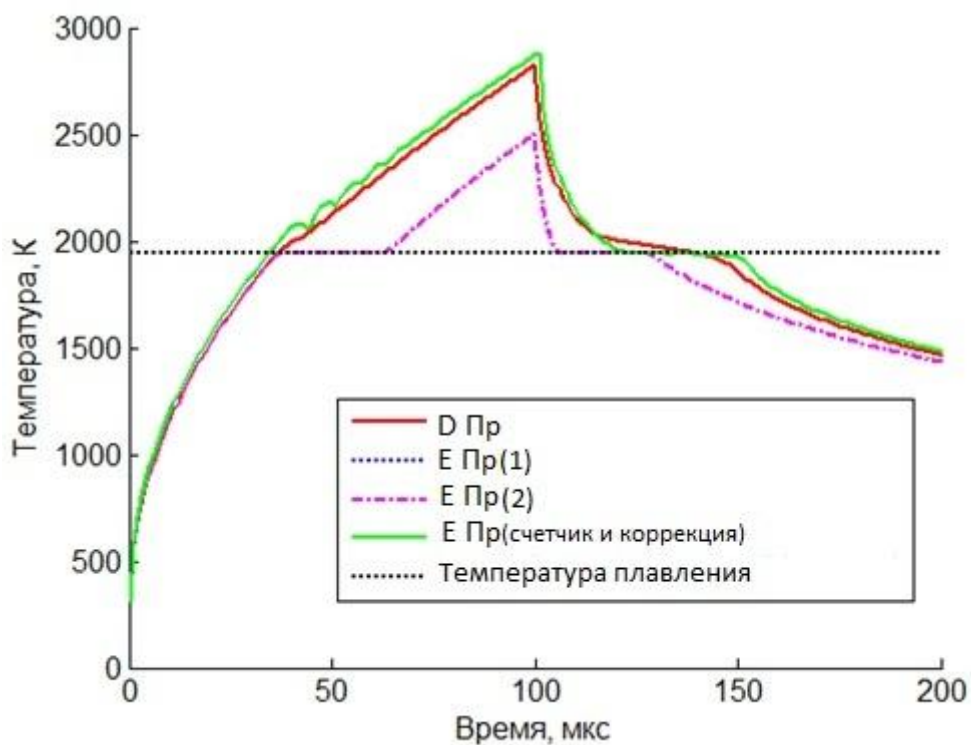


Рис.12. Температура поверхности образца титана методом прогонки;

$$E_0 = 20 \text{ Дж/см}^2, t_0 = 100 \text{ мкс}$$

Из рис. 11 и рис. 12 видно, что вычисление температуры поверхности титана методами прогонки и с использованием pde-Matlab решателя дают близкие результаты, за исключением E Matlab (2), где фазовый переход описывается по формулам (1.4.7-1.4.8).

Проведем вычисления температуры поверхности титана и сравним с экспериментальными измерениями [5].

3.4. Сравнение численных методов с экспериментальными данными

В уравнении (1.4.1) функция $p(r,z,t)$, характеризующая внешний источник нагрева, которая определяется в соответствии с экспериментальной мощностью $U(t)I(t)$ (рис. 8) и суммарного радиального распределения плотности энергии пучка на мишени (рис. 9): $p(r,z,t) = U(t)I(t)/(\pi r_0^2)$, где r_0 – средний радиус пучка. При энергии электронов 13 кэВ, длительности импульса 100 мкс и радиусе пучка 2 см можно считать источник энергетического воздействия поверхностным, а тепловые процессы рассматривать в одномерном приближении.

На рис. 13 – 19 представлены экспериментальные зависимости от времени температуры поверхности титана [5] и расчетные с использованием дельта – функции (1.4.3 – 1.4.4) и энтальпийного подхода (1.4.5. – 1.4.6) при плотности энергии $E = 8; 15; 20$ Дж/см² и длительности импульса 100 мкс.

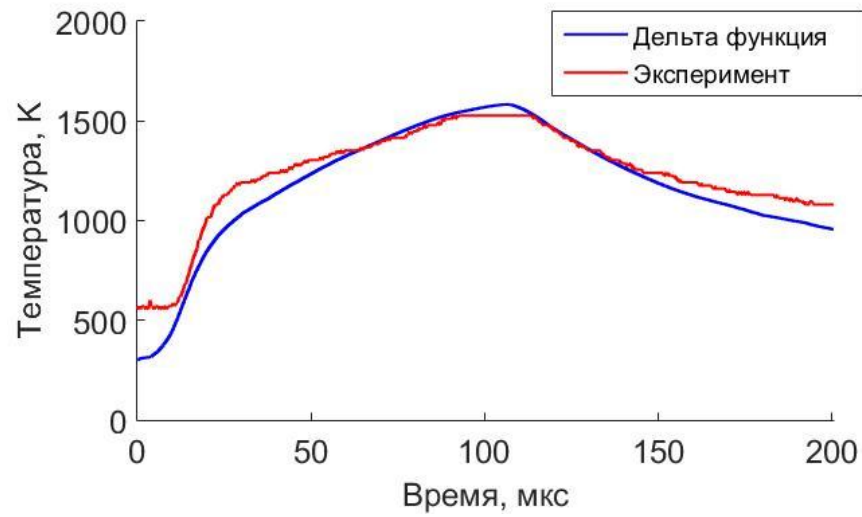


Рис. 13. Экспериментальная и расчетная температура поверхности титана; $E=8 \text{ Дж/см}$

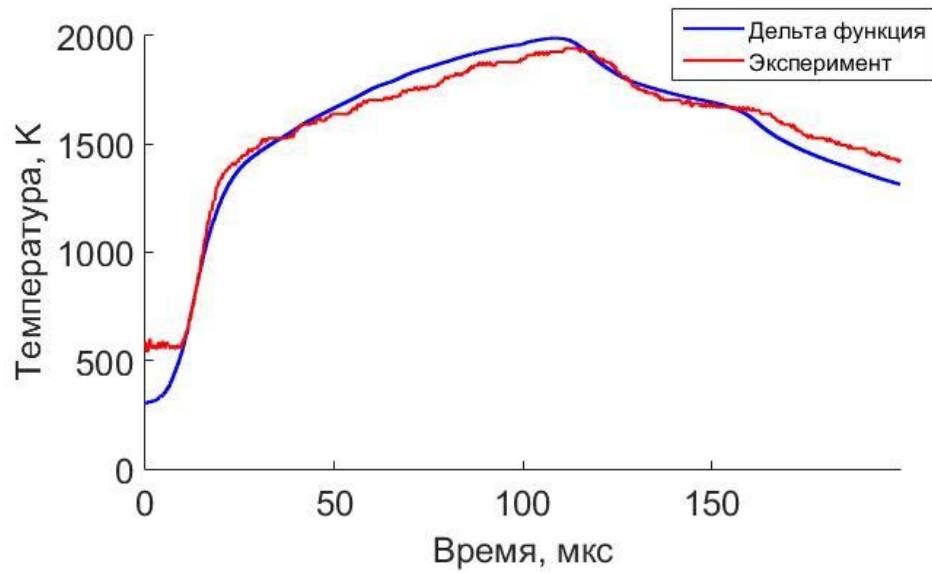


Рис. 14. Экспериментальная и расчетная температура поверхности титана; $E=15 \text{ Дж/см}^2$

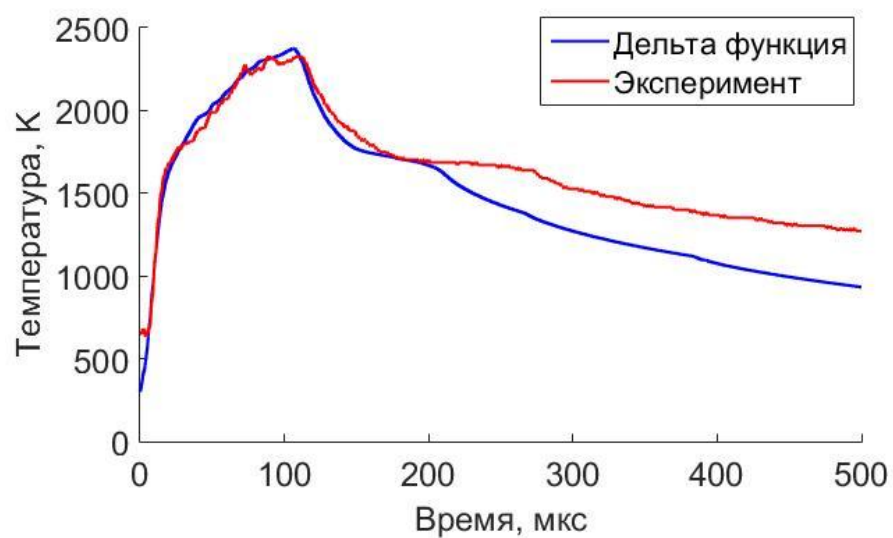


Рис. 15. Экспериментальная и расчетная температура поверхности титана; $E=20 \text{ Дж/см}^2$

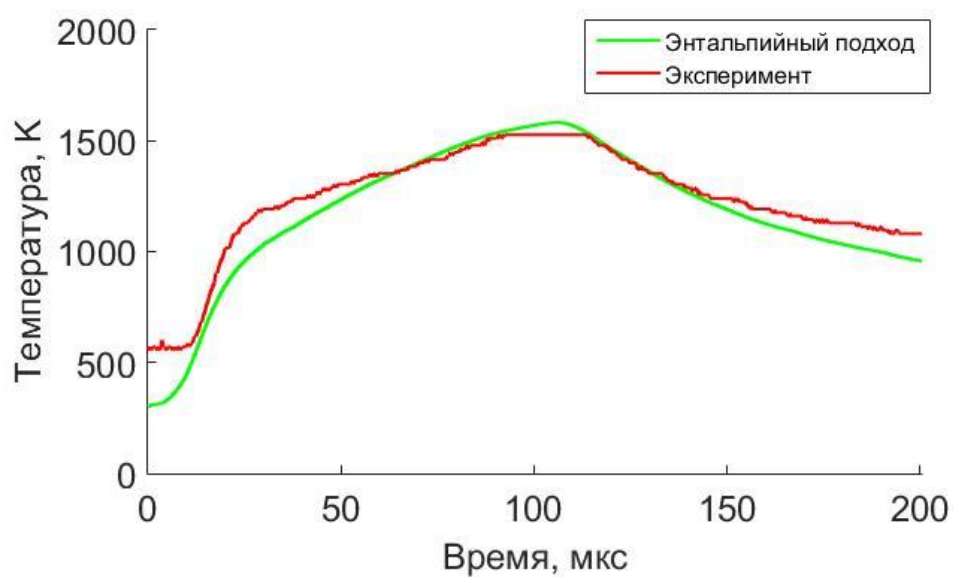


Рис.16. Экспериментальная и расчетная температура поверхности титана; $E=8 \text{ Дж/см}^2$

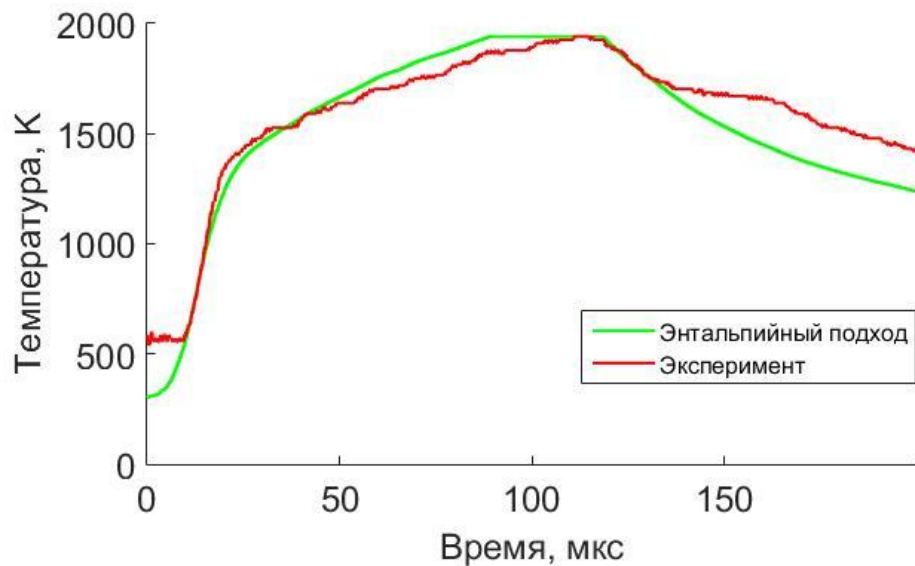


Рис. 17. Экспериментальная и расчетная температура поверхности титана; $E=15 \text{ Дж/см}^2$

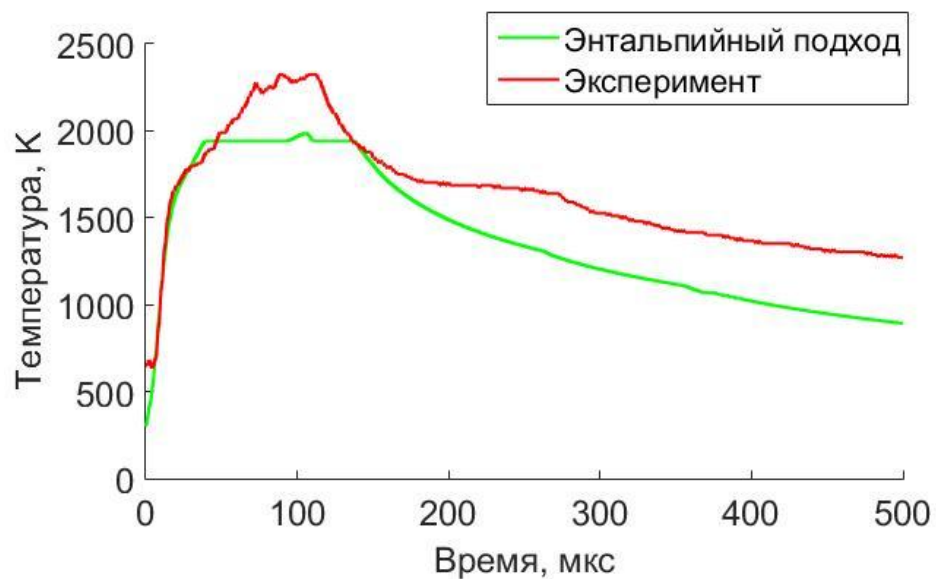


Рис. 18. Экспериментальная и расчетная температура поверхности титана; $E=20 \text{ Дж/см}^2$

Как видно из рис. 13 – 18, фазовые переходы (при расплаве и кристаллизации) наиболее корректно описываются с дельтаобразной функцией. На рис. 19 для сравнения показана экспериментальная температура поверхности титана и расчетная при рассмотренных методах решения.

Плавление и кристаллизация приводят к появлению особенностей в характере температурных кривых, связанных с фазовым переходом первого рода и наличием теплоты перехода. При обработке титана импульсным низкоэнергетическим электронным пучком высокая степень переохлаждения и процесс кристаллизации могут протекать при температурах значительно ниже температуры плавления [14]. В условиях эксперимента кристаллизация протекает при температуре ниже на 280 градусов, чем температура плавления [5]. Расхождение расчета и эксперимента (рис. 15) может быть связано, как с изменением свойств титана (при переходе одной кристаллической модификации в другую), так и необходимостью учета свойств источника плотности энергии, т.е. электронного пучка.

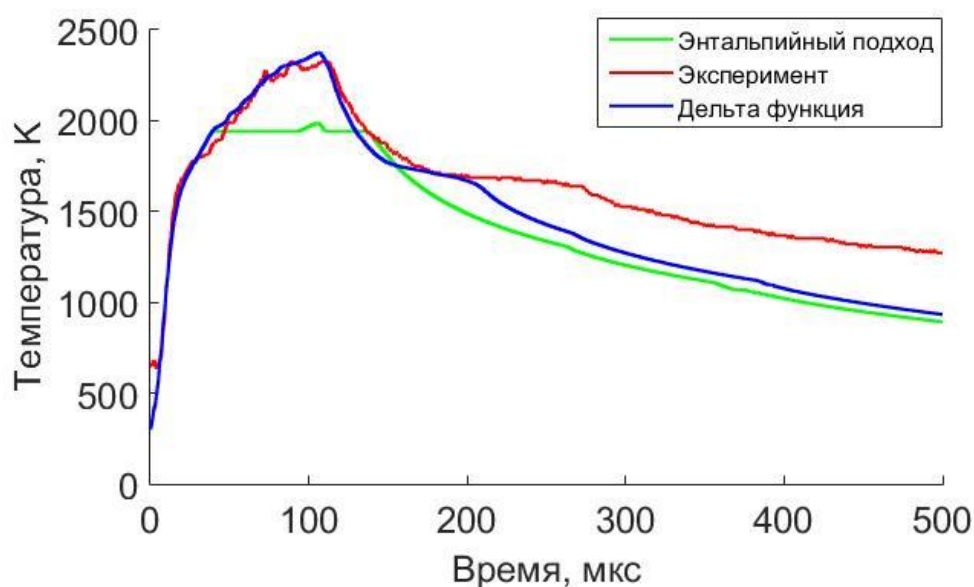


Рис. 19. Сравнение эксперимента с численными решениями при плотности $E=20 \text{ Дж/см}^2$

IV. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. В свою очередь, **сегмент рынка** – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга). Можно применять географический, демографический, поведенческий и иные критерии сегментирования рынка потребителей, возможно применение их комбинаций с использованием таких характеристик, как возраст, пол, национальность, образование, любимые занятия, стиль жизни, социальная принадлежность, профессия, уровень дохода.

Объектом исследования являются методы отражения энергетических и температурных полей в титановой мишени при импульсно-пучковой обработке.

Взаимодействие пучков заряженных частиц (электронов и ионов разных видов) изучается параллельно с разработкой и совершенствованием источников этих излучений. Если сначала исследовательские работы носили чисто академический характер, то в настоящее время пучки заряженных частиц достаточно широко применяются в технологических целях. Основные промышленные отрасли, которые являются потребителями этих технологий, - это машиностроение, электроника и радиоэлектроника, ядерная и космическая техника.

4.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

С этой целью может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках:

- технические характеристики разработки;
- конкурентоспособность разработки;
- уровень завершенности научного исследования (наличие макета, прототипа и т.п.);
- бюджет разработки;
- уровень проникновения на рынок;
- финансовое положение конкурентов, тенденции его изменения и т.д.

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

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

Кф – метод решения уравнения теплопроводности с помощью дельта – функции;

K1 – решение уравнения теплопроводности энтальпийным подходом.

Таблица 1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _ф	Б _{к1}	К _ф	К _{к1}
1	2	3	4	6	7
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Точность расчетов	0,3	5	3	1,5	0,9
2. Визуализация данных	0,3	4	3	1,2	0,9
3. Трудность реализации метода	0,2	3	3	0,6	0,6
Экономические критерии оценки эффективности					
1. Конкурентоспособность продукта	0,1	4	2	0,4	0,2
2. Послепродажное обслуживание	0,1	5	2	0,5	0,2
Итого	1	26	19	4,2	2,8

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в табл. 1, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод об оптимальном уровне конкурентоспособности программного продукта. Уязвимость конкурентного продукта связана со средним уровнем функциональности, а также с невозможностью внесения дополнительного функционала после продажи продукта.

4.3. SWOT-анализ

SWOT-анализ – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

В табл. 2 представлен SWOT-анализ в виде таблицы, так же показаны результаты пересечений сторон, возможностей и угроз.

Таблица 2 - SWOT - анализ

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта:	Слабые стороны научно-исследовательского проекта:
	С1. Низкие денежные затраты на разработку; С2. Возможность точно моделировать температурное поле титана без эксперимента. С3. Работа реализована в математическом пакете Matlab; С4. Высокая точность и достоверность результатов	Сл1. Трудность получения экспериментальных данных; Сл2. Большой срок выхода на рынок.
Возможности: В1. Доработка продукта; В2. Возможность интегрировать с другими системами; В3. Возможность продать разработку.	Возможность продажи разработки, что реализовать с помощью такой сильной стороны, как низкие денежные затраты на разработку.	Уровень проникновения на рынок может увеличить за счет расширения программы, обеспечение поддержки и повышение стоимости конкурентов.
Угрозы: У1. Отсутствие коммерческого интереса к проекту; У2. При отсутствии развития проекта его конкурентоспособность будет только снижаться; У3. Отсутствие спроса на доработку.	Отсутствие спроса на расширение и отказ от технической поддержки может снизить цену программы.	Отсутствие спроса понижает уровень проникновения на рынок.

Исходя из результатов SWOT-анализа, можно сделать вывод о том, что при разработке системы большое внимание должно уделяться задаче

доработки продукта, поскольку благодаря сильным сторонам системы обеспечивается защита от угроз, а также открываются возможности по расширению такой системы.

4.4. Инициация проекта

Цели и результат проекта. В данном разделе необходимо привести информацию о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта. Это могут быть заказчики, спонсоры, общественность и т.п. Информацию по заинтересованным сторонам проекта представить в табл.3.

Таблица 3 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
НИ ТПУ	Получения результатов исследования методов отражения энергетических и температурных полей в титановой мишени при импульсно-пучковой обработке.
РНФ	

В табл.4 необходимо представить информацию о иерархии целей проекта и критериях достижения целей. Цели проекта должны включать цели в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Таблица 4 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Поиск самого точного метода для уравнивания теплопроводности с учетом фазовых переходов.
Ожидаемые результаты проекта:	Модель температурного поля для мишени титана
Критерий результатов	Точное моделировать температурное поле титана без эксперимента
Требования к результату проекта:	Требование:
	- Рассмотреть несколько методов для решения задачи;
	- Сравнить методы между собой и с экспериментальными данными;
	- Выявить самый точный метод;

Организационная структура проекта

На данном этапе работы необходимо решить следующие вопросы: кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Данная информация представлена в таб. 5.

Таблица 5 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо-затраты, час.
1	Коваль Т.В. ТПУ, кафедра ПИ, д.ф.-м.н. профессор	Руководитель проекта	Определение задач, консультирование, контроль выполнения	32
2	Федорова Е.Н. Магистрант	Исполнитель по проекту	Выполнение ВКР	474
ИТОГО:				506

В ходе реализации научного проекта, помимо магистранта, задействован ряд специалистов:

Руководитель проекта – отвечает за реализацию проекта в пределах заданных ограничений по ресурсам, координирует деятельность участников проекта. В большинстве случаев эту роль выполняет руководитель магистерской диссертации.

Исполнитель проекта – специалист, выполняющий отдельные работы по проекту. В случае, если магистерская работа является законченным научным исследованием – исполнителем проекта является магистрант. В случае, если магистерская работа является частью научного проекта, исполнителей может быть несколько.

Ограничения и допущения проекта

Ограничения проекта – это все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» - параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта.

Таблица 6 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	190926 руб.
3.1.1. Источник финансирования	ТПУ
3.2. Сроки проекта:	06.06.2019
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	01.02.2019
3.2.2. Дата завершения проекта	01.06.2019

4.5. План проекта

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.

Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в табл. 7.

Таблица 7 – План проекта с этапами работ и распределением исполнителей по их видам

Номер работы	Название	Длительность, дни	Дата начало работ	Дата окончания работ	Должность исполнителя
1	Составление и утверждение задания	2	01.02.2019	02.02.2019	Руководитель
2	Подбор материала, его анализ и обобщение	16	04.02.2019	21.02.2019	Магистр, руководитель
3	Разработка алгоритмов процедур решения задач	21	22.02.2019	20.03.2019	Магистр
4	Проектирование и реализация	16	21.03.2019	16.04.2019	Магистр
5	Тестирование моделей	5	17.04.2019	22.04.2019	Магистр

6	Анализ полученных результатов	7	23.04.2019	1.05.2019	Магистр
7	Составление отчета о проделанной работе и оценка эффективности и полученных результатов	14	2.05.2019	20.05.2019	Магистр, руководитель
Итоги		81			

Календарный план-график строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта и представлен в табл. 8.

Таблица 8 – Диаграмма Ганта

Код работы	Вид работ	Исполнитель	Тк, кал, дн.	Продолжительность выполнения работ															
				Февраль				Март				апрель				май			
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Составление задания	Руководитель	2	■															
2	Подбор материала, его анализ	Магистр, руководитель	17	■	■	■	■												
3	Разработка алгоритмов процедур решения задач	Магистр	16				■	■	■	■	■								
4	Проектирование и реализация	Магистр	23								■	■	■	■	■				

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Бумага форматная белая для офисной техники	Paperline Gold, A4	500 листов	0,5	280
Шариковая ручка синяя	PILOT, 0,7 мм	2 шт	58	116
Всего за материалы				396
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				16
Итого				412

$$C_m = 412 \text{ руб.}$$

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям, представленным в табл. 9.

Основные работы для ВКР проводились за персональным компьютером (ноутбуком) в пределах научного комплекса. Время, проведенное работой у компьютера, примем равным 474 часов. Мощность ноутбука: 0,9 кВт.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = \Pi_{\text{эл}} \cdot P \cdot F_{\text{об}} = 5,8 \cdot 0,9 \cdot 474 = 2474,$$

где $\Pi_{\text{эл}}$ – тариф на промышленную электроэнергию (5.8 руб. за 1 кВт·ч); P – мощность оборудования, кВт; $F_{\text{об}}$ – время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 2474 рублей.

Таблица 10 – Цифровые продукты

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Matlab	Подписка на 1 месяца	1	6 380	25520
Windows 10 Домашняя	-	1	12 857	12 857
TPUNet	Оплата за 1 месяц	4	350	1400
Microsoft Office	Подписка на 1 месяц	4	375	1500

Компьютер	-	1	25000	25000
Итого				66277
С учетом статьи С_м				66689

4.7 Основная заработная плата исполнителей 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.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НТИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$З_{зп} = З_{осн} + З_{доп},$$

где, $З_{осн}$ – основная заработная плата, $З_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $З_{осн}$).

Основная заработная плата руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p,$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата одного работника, T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн., $З_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_{\text{м}} \cdot М}{F_{\text{д}}},$$

где $З_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.; $М$ – количество месяцев работы без отпуска в течение года; при отпуске в 48 раб. дней $М = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя; $F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (табл. 11).

Таблица 11 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Магистр
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52	52
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	48	48
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Месячный должностной оклад работника:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}},$$

где $З_{\text{тс}}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $З_{\text{тс}}$);

$k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;

$k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томской области).

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 12.

Таблица 12 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	З _{тс} , руб.	k _{пр}	k _д	k _р	З _м , руб	З _{дн} , руб.	Т _р , раб. дн.	З _{осн} , руб.	З _{доп} , руб.
Руководитель	47104	0,3	-	1,3	79605	3317	5	16585	1658
Магистр	12664	0	-	1,3	16 463	682	79	53878	5387
Итого З_{осн}								70463	7045

*Дополнительная з/п 10% от основной для руководителя и инженера.

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 следующей формулы:

$$З_{внеб} = k_{внеб} \cdot (З_{осн} + З_{доп}),$$

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

На 2014 г. в соответствии с Федеральным закона от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность в 2017 году водится пониженная ставка – 27,1%.

Отчисления во внебюджетные фонды рекомендуется представлять в табл. 13.

Таблица 13 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Руководитель	Магистр
Основная заработная плата, руб.+дополнит.	18243	59265
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	0,271
Сумма отчислений	4943	16060
Итого	21003	

Накладные расходы

В данную статью входят расходы на содержание аппарата управления и общехозяйственных служб. По этой статье учитываются оплата труда административно-управленческого персонала, содержание зданий, оргтехники и хозинвентаря, амортизация имущества, расходы по охране труда и подготовке кадров.

Накладные расходы составляют 30 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнение темы. Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов.

Накладные расходы составят:

$$C_{\text{накл}} = 0,3 \cdot 77508 = 23252 \text{ руб.}$$

Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 14.

Таблица 14 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты НТИ	66689
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	70463
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	7045
4. Отчисления во внебюджетные фонды	21003
5. Прочие прямые затраты (электроэнергия)	2474
6. Накладные расходы	23252
Бюджет затрат НТИ	190926

4.8 Реестр рисков

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Информация по данному разделу была сведена в таблицу 15.

Таблица 15 - Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность	Влияние	Уровень риска*	Способы смягчения риска
1	Неточность вычислений	Сложности при сравнении расчетных и реальных характеристик пучка	1	3	Низкий	Поиск данных с других источников
2	Поломка компьютера	Затруднение проведения вычислений	3	4	Выше среднего	Предоставление студенту рабочего места с компьютером и необходимым ПО

4.9 Определение ресурсной, 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 получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп. i}}$ – интегральный финансовый показатель разработки; Φ_{pi} – стоимость i-го варианта исполнения; Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

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

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

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 – балльная оценка i-го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности проведен в форме таблицы (таб. 16).

Исп.1 – решение задачи методом с дельтаобразной функции;

Исп.2 – решение задачи энтальпийным методом.

Таблица 16 - Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2
1. Соответствие теории и эксперимента	0,25	4	4
2. Удобство в эксплуатации	0,20	5	3
3. Точность вычисления	0,30	5	2
4. Время проведения измерений	0,25	5	4
ИТОГО	1	19	13

$$I_{p-исп1} = 4 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,30 + 5 \cdot 0,25 = 4,75$$

$$I_{p-исп2} = 4 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,30 + 4 \cdot 0,25 = 3,2$$

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

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр.1}}, \quad I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{финр.2}} \text{ и т.д.}$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта (см.табл.16) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ($\mathcal{E}_{cp}$):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}}$$

Таблица 17 - Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4.75	3.2
3	Интегральный показатель эффективности	4.75	3.2
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1.48	0.6

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в магистерской работе технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

V. Социальная ответственность

В данном разделе проанализированы проблемы, связанные с организацией рабочего места инженера – программиста в соответствии с нормами производственной санитарии, техники безопасности, охраны труда и окружающей среды. Все вышеупомянутые аспекты регламентируются рядом соответствующих документов.

Инженеру - программисту необходимо реализовать различные варианты решения задач на поиск оптимального управления для организма человека. Оптимальное управление представляет собой набор воздействий, применяемых к пациенту в различные моделируемые моменты времени. Алгоритмы решения оптимизационных задач различают по скорости работы, требовательности к памяти компьютера и размеру начальных данных. Разработанная система интеллектуальной поддержки принятия решения может быть полезна для сотрудников медицинских учреждений и исследовательских институтов. В данном разделе представлены вредные и опасные факторы, которые оказывают негативное влияние на организм программиста при выполнении работы за персональным компьютером. Так же описаны ЧС, которые могли случиться на рабочем месте и действия, которые необходимо выполнить в случае их возникновения.

5.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлен в таблице 18.

Таблица 18 – Опасные и вредные факторы на рабочем месте инженера-программиста

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003 - 74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	

Работа за персональным компьютером в офисном помещении	1) Повышенный уровень шума на рабочем месте; 2) повышенная или пониженная влажность воздуха; 3) повышенный уровень электромагнитных излучений; 4) повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны; 5) недостаточная освещенность рабочей зоны; 6) статические физические перегрузки.	1) Повышенный уровень статического электричества; 2) короткое замыкание; 3) опасность поражения эл.током	1) Шум. Общие требования безопасности устанавливаются ГОСТ 12.1.003–83 ССБТ [2]. 2) Показатели микроклимата устанавливаются СанПиН 2.2.2.548-96 [3]. 3) Нормы освещения устанавливаются СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03 [4]. 4) Допустимые уровни напряженности электростатических полей устанавливается ГОСТ 12.1.045–84 ССБТ [5]. 5) ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования [7]. 6) Электробезопасность устанавливается по ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ [6]. 7) ГОСТ 12.0.003-74 8) ГОСТ 12.0.003-74 9) ГОСТ 12.0.003-74
--	--	--	--

5.2. Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов

Повышенный уровень электромагнитных излучений

Известно, что ПЭВМ 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 2.2.2/2.4.1340-03:

1. Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг ПЭВМ по электрической составляющей должна быть не более:

- В диапазоне частот 5Гц-2кГц - 25В/м;
- В диапазоне частот 2кГц/400кГц - 2,5В/м.

2. Плотность магнитного потока должна быть не более:

- В диапазоне частот 5Гц-2кГц - 250нТл;
- В диапазоне частот 2кГц/400кГц - 25нТл.

3. Напряжённость электростатического поля должна быть 15 кВ/м;

4. Электростатический потенциал экрана видеомонитора – 500 В.

Среди средств защиты от ЭМП выделяют следующие:

1. Организационные мероприятия – выбор рациональных режимов работы оборудования, ограничение места и времени нахождения персонала в зоне воздействия ЭМП, т.е. защита расстоянием и временем;

2. Инженерно-технические мероприятия, включающие рациональное размещение оборудования, использование средств, ограничивающих поступление электромагнитной энергии (поглотители мощности, экранирование и т.п.);

3. Лечебно-профилактические мероприятия в целях предупреждения, ранней диагностики и лечения здоровья персонала;

4. Средства индивидуальной защиты, к которым относятся защитные очки, щитки, шлемы, защитная одежда, выполненная из металлизированной ткани (кольчуга). При этом следует отметить, что использование СИЗ возможно при кратковременных работах и является мерой аварийного характера.

В данном случае воздействие ЭМП происходит только от монитора компьютера. Исходя из паспортных данных компьютера и монитора, они соответствуют нормам ТСО-99, ТСО-03.

Ионизирующее излучение вызывает в организме цепочку обратимых и необратимых последствий. Ионизирующая радиация при воздействии на организм человека может вызвать два вида эффектов: детерминированные пороговые эффекты (лучевая болезнь, лучевой ожог, лучевая катаракта, лучевое бесплодие и др.) и стохастические (вероятностные) беспороговые эффекты (злокачественные опухоли, лейкозы, наследственные болезни).

Оценка уровней ионизирующих излучений проводится при работе компьютерами, оснащенными мониторами с электроннолучевой трубкой. В данном случае работа велась за компьютером, снабженным монитором с жидкокристаллическим дисплеем, поэтому оценка параметров по данному пункту раздела не проводилась.

Электростатическое поле

Электризация заключается в следующем: нейтральные тела, в нормальном состоянии не проявляющие электрических свойств, при условии отрицательных контактов или взаимодействий становятся электростатически заряженными. Опасность возникновения статического электричества проявляется в возможности образования электрической искры и вредном воздействии его на человеческий организм, и не только в случае непосредственного контакта с зарядом, но и за счет действий электрического поля, которое возникает при заряде. При включенном питании компьютера на

экране дисплея накапливается статическое электричество. Электрический ток искрового разряда статического электричества мал и не может вызвать поражение человека. Тем не менее, вблизи экрана электризуется пыль и оседает на нем. В результате чего искажается резкость восприятия информации на экране. Кроме того, пыль попадает на лицо работающего и в его дыхательные пути.

Основные способы защиты от статического электричества следующие: заземление оборудования, увлажнение окружающего воздуха. Также целесообразно применение полов из антистатического материала.

Производственный шум и вибрация

Вентиляция производственных помещений предназначена для уменьшения запыленности, задымленности и очистки воздуха от вредных выделений производства, а также для сохранности оборудования. Она служит одним из главных средств оздоровления условий труда, повышения производительности и предотвращения опасности профессиональных заболеваний. Система вентиляции обеспечивает снижение содержания в воздухе помещения пыли, газов до концентрации не превышающей ПДК. Проветривание помещения проводят, открывая форточки. Проветривание помещений в холодный период года допускается не более однократного в час, при этом нужно следить, чтобы не было снижения температуры внутри помещения ниже допустимой. Воздухообмен в помещении можно значительно сократить, если улавливать вредные вещества в местах их выделения, не допуская их распространения по помещению. Для этого используют приточно-вытяжную вентиляцию. Кратность воздухообмена не ниже 3.

Предельно допустимый уровень (ПДУ) шума – это уровень фактора, который при ежедневной (кроме выходных дней) работе, но не более 40 часов в неделю в течение всего рабочего стажа, не должен вызывать заболеваний

или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений. Соблюдение ПДУ шума не исключает нарушения здоровья у сверхчувствительных лиц.

Допустимый уровень шума ограничен ГОСТ 12.1.003-83 и СанПиН 2.2.4/2.1.8.10-32-2002. Уровень шума на рабочем месте математиков-программистов и операторов видеоматериалов не должен превышать 50дБА, а в залах обработки информации на вычислительных машинах - 65дБА.

При значениях выше допустимого уровня необходимо предусмотреть СКЗ и СИЗ.

1. СКЗ:

— устранение причин шума или существенное его ослабление в источнике образования;

— изоляция источников шума от окружающей среды средствами звукопоглощения;

— применение средств, снижающих шум и вибрацию на пути их распространения.

2. СИЗ:

— применение спецодежды, спецобуви и защитных средств органов слуха: наушники, беруши, антифоны.

Защита от шумов – заключение вентиляторов в защитный кожух и установление их внутри корпуса ЭВМ. Для снижения уровня шума стены и потолок помещений, где установлены компьютеры, могут быть облицованы звукопоглощающими материалами с максимальными коэффициентами звукопоглощения в области частот 63 - 8000 Гц.

Кроме того, для снижения шума на рабочем месте, можно применить следующие действия:

- установить пластиковые окна, для улучшения шумоизоляции;
- использовать звукопоглощающие материалы, такие как пенополистерол, поролоновые маты, пробковые полотна и плиты;
- устройство подвесного потолка, который служит звукопоглощающим экраном.

Микроклимат в помещении

Микроклимат производственных помещений – это климат внутренней среды помещений, который определяется действующими на организм сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха, а также температуры окружающих поверхностей. Показатели микроклимата должны обеспечивать сохранение теплового баланса человека с окружающей средой и поддержание оптимального или допустимого теплового состояния организма человека.

Оптимальные микроклиматические при воздействии на человека в течение рабочей смены обеспечивают сохранение теплового состояния организма и не вызывают отклонений в состоянии здоровья. Допустимые микроклиматические условия могут приводить к незначительным дискомфортным тепловым ощущениям. Возможно временное (в течение рабочей смены) снижение работоспособности, без нарушения здоровья.

Нормы оптимальных и допустимых метеорологических условий устанавливает СанПиН 2.2.4.548–96. Эти нормы устанавливаются в зависимости от времени года, характера трудового процесса и характера производственного помещения. Все категории работ разграничиваются на основе интенсивности энергозатрат организма в ккал/ч (Вт). Работа, выполняемая математиком-экономистом, производимая сидя и сопровождающаяся незначительным физическим напряжением, относится к категории *Ia* – работа с интенсивностью энергозатрат до 120 ккал/ч (до 139 Вт). Для данной категории допустимые нормы микроклимата помещения представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений

Сезон года	Категория тяжести выполняемых работ	Температура, С°		Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/сек	
		Фактическое значение	Допустимое значение	Фактическое значение	Допустимое значение	Фактическое значение	Допустимое значение
Холодный	Ia	(21÷23)	(20÷25)	55	(15÷75)	0,1	0,1
Теплый	Ia	(22÷24)	(15÷28)	55	(20÷80)	0,1	0,5

Анализируя, данные таблицы 1 и состояние рабочей комнаты, микроклимат которой поддерживается на оптимальном уровне системой водяного центрального отопления и естественной вентиляцией, можно сделать вывод, что параметры микроклимата производственного помещения соответствуют нормам.

В производственных помещениях, где допустимые нормативные величины микроклимата поддерживать не представляется возможным, необходимо проводить мероприятия по защите работников от возможного перегрева и охлаждения. Это достигается различными средствами: применением систем местного кондиционирования воздуха; использованием индивидуальных средств защиты от повышенной или пониженной температуры; регламентацией периодов работы в неблагоприятном микроклимате и отдыха в помещении с микроклиматом, нормализующим тепловое состояние; сокращением рабочей смены и др.

Профилактика перегрева работников в нагревающем микроклимате включает следующие мероприятия: нормирование верхней границы внешней термической нагрузки на допустимом уровне применительно к 8-часовой

рабочей смене; регламентация продолжительности воздействия нагревающей среды (непрерывно и за рабочую смену) для поддержания среднесменного теплового состояния на оптимальном или допустимом уровне; использование специальных СКЗ и СИЗ, уменьшающих поступление тепла извне к поверхности тела человека и обеспечивающих допустимое тепловое состояние работников. Защита от охлаждения осуществляется посредством одежды, изготовленной в соответствии с требованиями ГОСТ 29335—92 и 29338—92 "Костюмы мужские и женские для защиты от пониженных температур. Технические условия"

Освещенность рабочей зоны

Освещение – важнейший фактор создания нормальных условий труда для работника. В случае недостатка освещенности рабочего места у человека не только уменьшается острота зрения, но и вызывается утомление организма в целом, что приводит к снижению производительности труда и увеличению опасности заболеваний.

Согласно санитарно-гигиеническим требованиям рабочее место с ПЭВМ должно освещаться комбинированным освещением. Естественное освещение поступает в помещение через одно окно в светлое время суток. Искусственное освещение обеспечивается за счет люминесцентных ламп типа ЛБ, в темное время суток, либо при недостаточном естественном освещении. Оно отличается относительной сложностью восприятия его зрительным органом человека.

С целью обеспечения требуемых норм освещенности необходимо произвести расчёт искусственной освещенности.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и

стен. Длина помещения $a = 8$ м, ширина $b = 5$ м, высота $H = 3,8$ м. Высота рабочей поверхности над полом $h_p = 0,8$ м. Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина λ , которая для люминесцентных светильников с защитной решёткой лежит в диапазоне 1,1–1,3.

Выбираем лампу дневного света ЛД-40, световой поток которой равен $\Phi = 2300$ Лм.

Выбираем светильники с люминесцентными лампами типа ШОД-2-40. Этот светильник имеет две лампы мощностью 40 Вт каждая, длина светильника равна 1228 мм, ширина – 284 мм.

Высота светильника над рабочей поверхностью h

$$h = H - h_p - h_c = 3,8 - 0,8 - 0,5 = 2,5$$

где H - высота помещения, м;

h_p - высота рабочей поверхности, м.

В результате проведенных расчетов, индекс освещенности i равен

$$i = \frac{S}{(a+b)h} = \frac{35}{(8+5) \cdot 2,5} = 1,07.$$

Расстояние между соседними светильниками или рядами определяется по формуле:

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 2,5 = 2,75 \text{ м.}$$

Расстояние от крайних светильников или рядов до стены определяется по формуле:

$$l = \frac{L}{3} = \frac{2,75}{3} = 0,91 \text{ м}$$

Размещаем светильники в два ряда. В каждом ряду можно установить 4 светильника типа ШОД-2-40 (с длиной 1,228м), при этом разрывы между светильниками в ряду составят 50 см. Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении $N = 16$.

Световой поток лампы определяется по формуле:

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

где E_H – нормируемая минимальная освещённость по СНиП 23-05-95, лк;

S – площадь освещаемого помещения, м²;

K_z – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, светотехнической арматуры, стен и пр., т. е. отражающих поверхностей), наличие в атмосфере цеха дыма, пыли;

Z – коэффициент неравномерности освещения, отношение E_{cp} / E_{min} . Для люминесцентных ламп при расчётах берётся равным 1,1;

N – число ламп в помещении;

η – коэффициент использования светового потока.

Данное помещение относится к типу помещения со средним выделением пыли, в связи с этим $K_z = 1,5$; состояние потолка – свежепобеленный, поэтому значение коэффициента отражения потолка $\rho_n = 70$; состояние стен – побеленные бетонные стены, поэтому значение коэффициента отражения стен $\rho_c = 70$. Коэффициент использования светового потока, показывающий какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность, для светильников типа ОДОР с люминесцентными лампами при $\rho_n = 70\%$, $\rho_c = 50\%$ и индексе помещения $i = 1,07$ равен $\eta = 0,47$.

Нормируемая минимальная освещенность должна быть равна 300 лк.

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot K_z \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 40 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{16 \cdot 0,47} = 2632 \text{ Лм}$$

Для люминесцентных ламп с мощностью 40 Вт и напряжением сети 220В, стандартный световой поток ЛД равен 2300 Лм.

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

$$-10\% \leq 14,43\% \leq 20\%$$

Таким образом необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

Психофизиологические факторы и опасные факторы

Значительное умственное напряжение и другие нагрузки приводят к переутомлению функционального состояния центральной нервной системы, нервно-мышечного аппарата рук. Нерациональное расположение элементов рабочего места вызывает необходимость поддержания вынужденной рабочей позы. Длительный дискомфорт вызывает повышенное позвоночное напряжение мышц и обуславливает развитие общего утомления и снижение работоспособности.

При длительной работе за экраном дисплея появляется выраженное напряжение зрительного аппарата с появлением жалоб на неудовлетворительность работы, головные боли, усталость и болезненное ощущение в глазах, в пояснице, в области шеи, руках.

Режим труда и отдыха работника: при вводе данных, редактировании программ, чтении информации с экрана непрерывная продолжительность работы не должна превышать 4-х часов при 8-часовом рабочем дне. Через

каждый час работы необходимо делать перерыв на 5-10 минут, а через два часа на 15 минут.

С целью снижения или устранения нервно-психологического, зрительного и мышечного напряжения, предупреждение переутомления необходимо проводить комплекс физических упражнений и сеансы психофизической разгрузки и снятия усталости во время регламентируемых перерывов, и после окончания рабочего дня.

Электробезопасность

Электробезопасность представляет собой систему организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статистического электричества.

Электроустановки классифицируют по напряжению: с номинальным напряжением до 1000 В (помещения без повышенной опасности), до 1000 В с присутствием агрессивной среды (помещения с повышенной опасностью) и свыше 1000 В (помещения особо опасные).

В отношении опасности поражения людей электрическим током различают:

1. Помещения без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность.
2. Помещения с повышенной опасностью, которые характеризуются наличием в них одного из следующих условий, создающих повышенную опасность: сырость, токопроводящая пыль, токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т.п.), высокая температура, возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям, технологическим

аппаратам, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования - с другой.

3. Особо опасные помещения, которые характеризуются наличием оборудования свыше 1000 В и одного из следующих условий, создающих особую опасность: особой сырости, химически активной или органической среды, одновременно двух или более условий повышенной опасности. Территории размещения наружных электроустановок в отношении опасности поражения людей электрическим током приравниваются к особо опасным помещениям.

Помещение, где была разработана магистерская диссертация, принадлежит к категории помещений без повышенной опасности по степени вероятности поражения электрическим током, вследствие этого к оборудованию предъявляются следующие требования:

- экран монитора должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя (расстояния от источника);

- применение приэкранных фильтров, специальных экранов.

К средствам коллективной защиты от электрического тока можно отнести:

- защитное заземление;
- зануление;
- разделительные трансформаторы;
- защитное отключение;
- применение малых напряжений;
- изоляция;
- оградительные устройства;
- сигнализация, блокировка, знаки безопасности, плакаты.

Защитное заземление — это преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением.

Сопротивление заземления — основной показатель заземляющего устройства, определяющий его способность выполнять свои функции и определяющий его качество в целом.

Сопротивление заземления зависит от площади электрического контакта заземлителя (заземляющих электродов) с грунтом (“стекание” тока) и удельного электрического сопротивления грунта, в котором смонтирован этот заземлитель (“впитывание” тока). Согласно ПЭУ номинальное сопротивление заземления должно быть не более 4 Ом.

К основным электрозащитным средствам в электроустановках напряжением до 1000 В относятся:

- изолирующие штанги;
- изолирующие и электроизмерительные клещи;
- диэлектрические перчатки; изолированный инструмент.

Работать со штангой разрешается только специально обученному персоналу в присутствии лица, контролирующего действия работающего. При операциях с изолирующей штангой необходимо пользоваться дополнительными изолирующими защитными средствами — диэлектрическими перчатками и изолирующими основаниями (подставками, ковриками) или диэлектрическими ботами.

Изолирующие клещи применяют в электроустановках до 35 кВ для операций под напряжением с плавкими вставками трубчатых предохранителей, а также для надевания и снятия изолирующих колпаков на ножи однополюсных разъединителей. Изолирующие клещи выполняют из пластмассы.

При пользовании изолирующими клещами оператор должен надевать диэлектрические перчатки и быть изолированным от пола или грунта; при смене патронов трубчатых предохранителей он должен быть в очках. Клещи нужно держать в вытянутых руках.

К дополнительным изолирующим электрозащитным средствам относятся диэлектрические перчатки, боты, резиновые коврики и дорожки, изолирующие подставки на фарфоровых изоляторах и переносные заземления.

Перед началом работы следует убедиться в отсутствии свешивающихся со стола или висящих под столом проводов электропитания, в целостности вилки и провода электропитания, в отсутствии видимых повреждений аппаратуры и рабочей мебели, в отсутствии повреждений и наличии заземления приэкранного фильтра.

Безопасные номиналы: $U = 12-36\text{В}$, $I = 0,1\text{ А}$, $R_{\text{заз}} = 4\text{ Ом}$.

Чрезвычайные ситуации

Для обеспечения безопасности людей и сохранения материальных ценностей существует пожарная безопасность, основными системами которой являются системы предотвращения пожара и противопожарной защиты, включая организационно-технические мероприятия.

Пожар представляет большую опасность и наносит огромный ущерб, поскольку грозит уничтожением приборов, компьютеров, инструментов и комплектов документов, представляющих значительную ценность. Кроме того, пожар характеризуется опасностью для жизни человека. Возникновение пожара в комнате может быть обусловлено следующими факторами: в современных ПЭВМ очень высокая плотность размещения электронных схем. При протекании по ним электрического тока выделяется значительное количество тепла, что может привести к повышению температуры отдельных узлов до 100°C . При этом возможно оплавление изоляции соединительных проводов, их оголение, и, как следствие, короткое замыкание, сопровождаемое искрением.

Поэтому во избежание пожаров проводится пожарная профилактика – комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности людей, на предотвращение пожара, ограничение его распространения, а также на создание условий для успешного тушения пожара. Успех борьбы с пожаром во многом зависит от его своевременного обнаружения и быстрого принятия мер по его ограничению и ликвидации. Основы противопожарной защиты предприятий определены в стандартах ГОСТ 12.1.004-76 и ГОСТ 12.1.010-76.

Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера.

Причины возникновения пожара неэлектрического характера:

а) халатное неосторожное обращение с огнем (курение, оставленные без присмотра нагревательные приборы, использование открытого огня);

б) самовоспламенение и самовозгорание веществ.

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, искрение и электрические дуги, статическое электричество и т. п.

При эксплуатации ПЭВМ возможны возникновения следующих аварийных ситуаций: короткие замыкания, перегрузки, повышение переходных сопротивлений в электрических контактах, перенапряжение, возникновение токов утечки.

При возникновении аварийных ситуаций происходит резкое выделение тепловой энергии, которая может явиться причиной возникновения пожара.

Мероприятия по пожарной безопасности делятся на пожарную профилактику и тушение пожаров. Меры пожарной профилактики могут быть следующие: строительско-планировочные, технические и организационные.

Строительно-планировочные меры определяются огнестойкостью зданий и сооружений (выбор материалов конструкций по степени огнестойкости). В зависимости от степени огнестойкости определяются наибольшие дополнительные расстояния от выходов для эвакуации при пожарах.

Технические меры включают в себя соблюдение противопожарных норм для систем отопления, освещения, электрического обеспечения и т.д., использование разнообразных защитных систем и соблюдение параметров технологических процессов и режимов работы оборудования.

Организационные меры представляют собой проведение инструктажа персонала по пожарной безопасности, соблюдение мер пожарной безопасности, разработку планов эвакуации людей в случае пожара.

Для предупреждения возникновения пожара необходимо соблюдать следующие правила пожарной безопасности:

- правильная эксплуатация оборудования и содержание зданий и территорий;
- противопожарный инструктаж рабочих и служащих;
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

Согласно правилам пожарной безопасности, в Российской Федерации, в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их

количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгораемыми веществами такими, как деревянные шкафы, столы, двери.

В помещении для тушения возгораний предусмотрено использование углекислотного огнетушителя ОУ–3 для тушения возгораний классов А, В и электроустановок до 10000В при температуре воздуха –40°С до +50°С. Таким образом, состояние помещения соответствует нормам пожаробезопасности.

Экологичность разрабатываемой темы

Охрана окружающей среды - это комплексная проблема и наиболее активная форма её решения - это сокращение вредных выбросов промышленных предприятий через полный переход к безотходным или малоотходным технологиям производства.

С точки зрения потребления ресурсов компьютер потребляет сравнительно небольшое количество электроэнергии, что положительным образом сказывается на общей экономии потребления электроэнергии в целом.

Основными отходами являются черновики бумаги и отработавшие люминесцентные лампы. Бумагу направляют на утилизацию, а люминесцентные лампы собирают и направляют на утилизацию в соответствующую организацию.

При выполнении магистерской диссертации никакого ущерба окружающей среде нанесено не было.

5.3. Выводы и рекомендации

Проанализировав и оценив условия труда в рабочем помещении, где был разработан дипломный проект, можно сделать следующие выводы по производственной и экологической безопасности специалиста и работы, выполняемой им:

1. По занимаемой площади и объему помещение удовлетворяет нормативным требованиям.
2. Микроклимат, шумовая обстановка и система освещения в помещении соответствуют нормам и создают нормальные условия для работы.
3. Монитор компьютера служит источником ЭМП – вредного фактора, который отрицательно влияет на здоровье работника при непрерывной работе более 4 часов, во избежание негативного влияния на здоровье необходимо делать перерывы при работе с ЭВМ и проводить специализированные комплексы упражнений для глаз.
4. Помещение, в котором находится рабочее место, относится к помещениям без повышенной опасности поражения электрическим током. Температурный режим, влажность воздуха, химическая среда не способствуют разрушению изоляции электрооборудования.
5. По состоянию пожаробезопасности помещение соответствует нормам.

При рассмотрении вопроса об охране окружающей среды можно сказать, что деятельность помещения не является экологически опасной.

Заключение

Для улучшения физико-химических и эксплуатационных свойств материалов и изделий используются импульсные (20 – 200 мкс) электронные пучки (с плотностью энергии 8 - 25 Дж/см²), воздействующие на поверхность металлического материала. В работе проведено исследование влияния на температуру поверхности титана конфигурации импульса плотности мощности и длительности его фронта. Показано, что при сохранении энергии электронного пучка увеличение фронта импульса воздействия приводит к уменьшению температуры поверхности титана.

При решении нестационарного уравнения теплопроводности требуется учитывать фазовые переходы при расплаве и кристаллизации. В работе проведено сравнение различных методов численной реализации фазового перехода, а также сравнение численного решения методом прогонки и использования решателя в пакете Matlab. Показано, что решение задачи Стефана при представлении эффективной теплоемкости через дельта-функцию и энтальпийная форма уравнения теплопроводности (алгоритм со счетчиком и коррекцией [6]) дают близкие результаты.

Проведено вычисление температуры поверхности титана и сравнение экспериментально измеренной в импульсе (100 мкс) высокоскоростного воздействия электронного пучка (плотность энергии 10...25 Дж/см²) [5]. Показано удовлетворительное согласие расчета и эксперимента.

Методика измерения импульсной температуры [5] и использование численного моделирования тепловых полей в образце открывает возможность управления основными технологическими параметрами электронно-пучкового воздействия с целью получения заранее заданных свойств поверхности материалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калинин Б.А. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов: учебник для вузов. – М.: Круглый год, 2001. – 528 с.
2. Современные тенденции модифицирования структуры и свойств материалов / под ред. Н. Н. Ковалья и В. Е. Громова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2015. – 378 с.
3. Углов В.В. Модификация материалов компрессионными плазменными потоками – Минск: БГУ, 2013. – 248 с.
4. Engelko, V., Yatsenko B., Mueller G., Bluhm H. Pulsed electron beam facility (GESA) for surface treatment of materials / Vacuum. – 2001. – V. 62/2–3. – P. 211–216.
5. Тересов А. Д., Коваль Т.В., Москвин П.В., Чан Ми Ким Ан, Коваль Н.Н. / Исследование динамики нагрева и охлаждения поверхности титана плотным электронным пучком субмиллисекундной длительности. – Томск: Изд-во ТПУ, 2018.
6. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Теоретические основы обработки материалов импульсными электронными и ионными пучками: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 219 с.
7. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. – Спб.: Наука, 2004. – 742 с.
8. Князева А.Г., Буркина Н.В. Алгоритм численного решения задач неизотермической диффузии, встречающихся в процессах поверхностной обработки. – Физическая мезомеханика, – 2006. – №2. – С. 55-62.
9. Князева А.Г. Теплофизические основы современных высокотемпературных технологий: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 357 с.
10. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Эрозия поверхности твердого тела под действием мощных пучков заряженных частиц. – Новосибирск: Наука, 2014. – 248 с.

11. Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А., Иванова О.В., Иконникова И.А., Ткаченко А.В. Численное моделирование температурного поля силумина, облученного интенсивным электронным пучком // Изв. вузов. Физика. – 2015. – № 4. – С. 46-51.
12. Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н. / Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / под общ. ред. Н.Н. Ковалья и Ю.Ф. Иванова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016, - 304 с.
13. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы математической физики. – М.: Научный мир, 2003.– 316с.
14. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. – М.: Высшая школа, 2002. – 840с.
15. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. – М.: Наука, 1989. – 432 с.
16. Калиткин Н.Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
17. Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.: ил.
18. Физические величины. Справочник / А.П. Бачиев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
19. Григорьев С.В., Девятков В.Н., Коваль Н.Н., Тересов А.Д. // Письма ЖТФ. 2010. – №. 4. С. 23–31.
20. Koval N.N., Grigoryev S.V., Devyatkov V.N., Teresov A.D., Schanin P.M. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. V. 37. № 10. P. 1890–1896.
21. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
22. Гаврикова Н.А., Тухватулина Л.Р., Видяев И.Г., Серикова Г.Н., Шаповалова Н.В. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 73 с.
23. Белов С.В. Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды: учебник для академического бакалавриата / – М.: Юрайт, 2015. – 703 с.

24. Давыдов Б.И., Тихончук В.С., Антипов В.В. Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений. – М.: Энергоатомиздат, 1984. — 177 с.: ил.: 21.

Приложение А
Обязательное

III. Simulation of pulsed high-speed Electron Beam effects on Titanium

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8БМ71	Федорова Евгения Николаевна		

Консультант отделения информационных технологий ИШИТР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Коваль Тамара Васильевна	д.ф. - м.н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сидоренко Татьяна Валерьевна	к. пед. н.		

III. Simulation of pulsed high-speed Electron Beam effects on Titanium

3.1 Measurement of the Temperature of metals in a High-speed Pulse of an Electron Beam

The SOLO setup, designed and manufactured at the Institute of High Current Electronics SB RAS, allows surface modification of various materials and products [19]. The setup comprises a plasma-cathode pulsed electron source which is based on a low-pressure arc with a grid-stabilized cathode plasma boundary and is capable [20] of producing an electron beam with a pulse duration of 20–200 μs , current of 20–300 A, electron energy of 5–25 keV, and pulse energy density of up to 100 J/cm² at a repetition frequency of 0.3–20 s⁻¹. The operating pressure of the source lies in the range $(1-5) \times 10^{-2}$ Pa and is controlled through continuous gas supply (argon). When exposed to a pulsed electron beam, the surface of metal materials is rapidly heated and cooled with a rate of up to 10⁸ C/s and 10⁶–10⁷ C/s, respectively, and this allows surface smoothing, pulsed melt quenching, and considerable improvement of their physical, chemical, and service properties.

For temperature measurements [5], we used specimens of dimensions 12 × 12 × 4 mm made of high-purity VT1-0 Ti. The melting point is 1668°C for Ti. The specimens were fixed on a manipulator table. The manipulator was located inside the vacuum chamber of the SOLO setup, allowing horizontal specimen displacements and positioning for electron beam treatment.

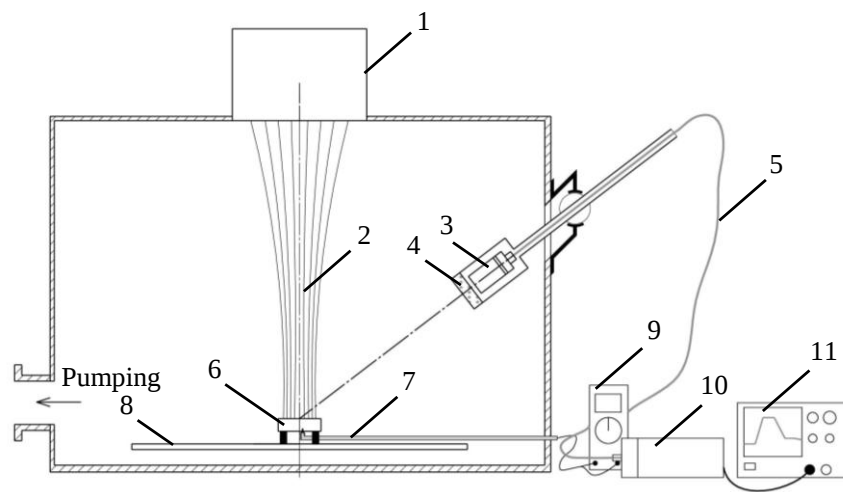


Fig. 7. Schematic for measuring the Al/Ti system surface temperature irradiated with an electron beam: 1 – electron source; 2 – pulsed electron beam; 3 – LVO 25 lens; 4 – KV quartz glass; 5 – optical waveguide; 6 – irradiated target; 7 – chromel–alumel thermocouple; 8 – two-axis manipulator table; 9 – multimeter; 10 – Kleiber KGA 740-LO high-speed infrared pyrometer; 11 – Tektronix TDS 1001B oscilloscope [5]

The characteristic current pulses are trapezoidal and have a rise time of 25 μs and FWHM of 100 μs at an accelerating voltage of 13 kV. Figure 8 shows typical waveforms of the discharge current, electron beam current, and Ti system surface temperature which is calculated after calibration as $298+199*U$, where U is the voltage (2 V/div).

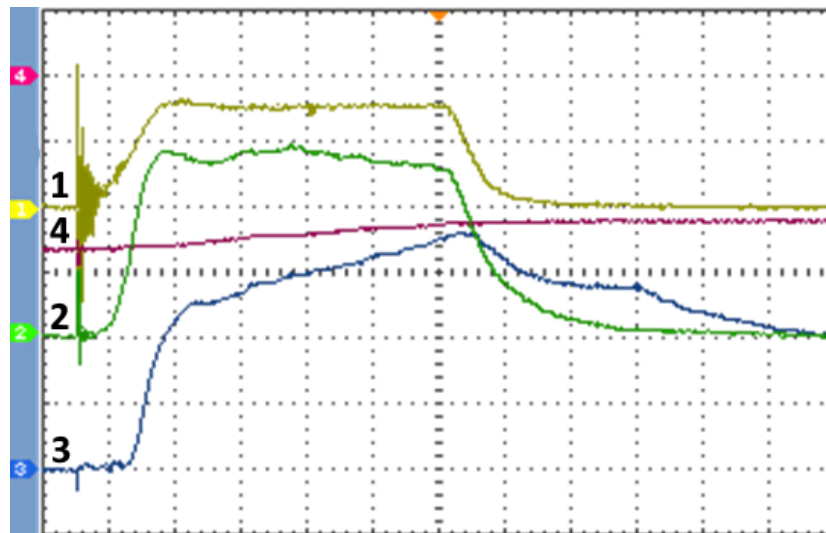


Fig. 8. Discharge current (1) and electron beam current, 40 A/div (2); accelerating voltage, 5 kV/div (4); and Ti system surface temperature, 2 V/div (3) [2]

The distribution of energy density at the collector, recorded using a partitioned calorimeter for a beam current of 40, 75 and 105 A, is shown in Fig. 9.

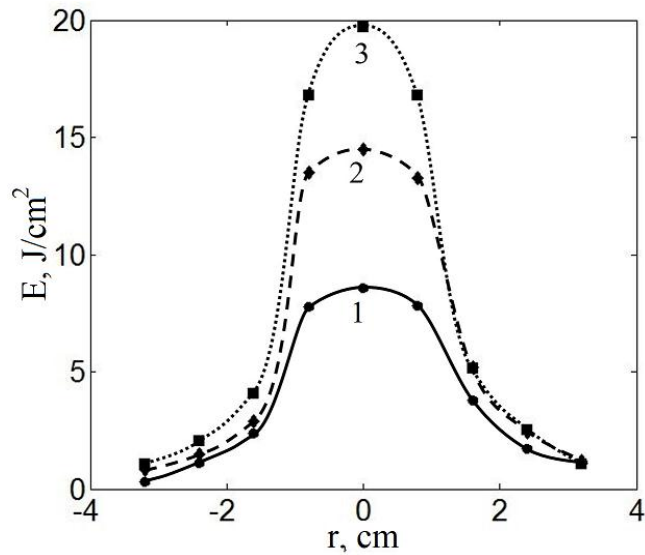


Fig. 9. Cross-sectional beam energy distribution near the target surface at $E = 8$ J/cm² (1), $E = 15$ J/cm² (2), and $E = 20$ J/cm² (3)

3.2 Programs. The parameters of the numerical experiment

Thermal processes in titanium processed by an intense low-energy electron beam are described by the heat equation (1.4.1), taking into account the phase transition and boundary conditions on the specimens surface (1.4.2).

The numerical solution of the heat equation was carried out by the tridiagonal matrix algorithm, as well as using the pde solver in the MATLAB package. To implement the methods of describing the phase transition (Chapter I, p. 1.4), 4 programs were used.

Program № 1: solving heat conduction problems with regard to the phase transition (using delta functions) by two methods: the pde-Matlab solver and the tridiagonal matrix algorithm.

Program № 2: solving heat conduction problems taking into account the phase transition (enthalpy form of the heat equation (1.4.5) - (1.4.6)) by two methods: the pde-Matlab solver and the tridiagonal matrix algorithm.

Program № 3: the solution of thermal conductivity problems taking into account the phase transition (using a counter and correction) by the tridiagonal matrix algorithm.

Program № 4: solving heat conduction problems according to formula (1.4.7) by two methods: the pde-Matlab solver and the tridiagonal matrix algorithm.

In our calculations, we used the following parameters: $T = 1000\text{ K}$, $\lambda = 22,3\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $c = 680\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, $\rho = 6,7\text{ kg/m}^3$, $T_{ph} = 1941\text{ K}$, $q_{нл} = 358\text{ kJ/kg}$, $q_{исп} = 8970\text{ kJ/kg}$.

3.3 Comparison of methods for the numerical implementation of the phase transition

We introduce the notation of methods for numerical solutions:

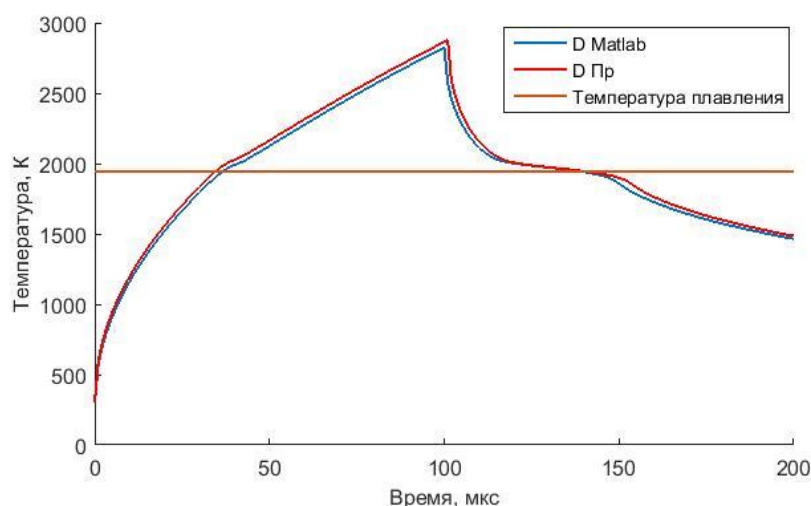
D Matlab and D Pr - a method with a delta function (1.4.3 –1.4.4) using a pde_Matlab solver and the tridiagonal matrix algorithm;

E Matlab (1) and E Pr - enthalpy approach (1.4.5 - 1.4.6) by the pde_Matlab solver and using the tridiagonal matrix algorithm;

E Matlab (2) - the enthalpy approach (1.4.7 - 1.4.8);

E Matlab (counter and correction) - enthalpy approach with counter and correction (using [6]).

We will study the effect of the smoothing parameter s in the delta function (1.4.4) on the phase transition.



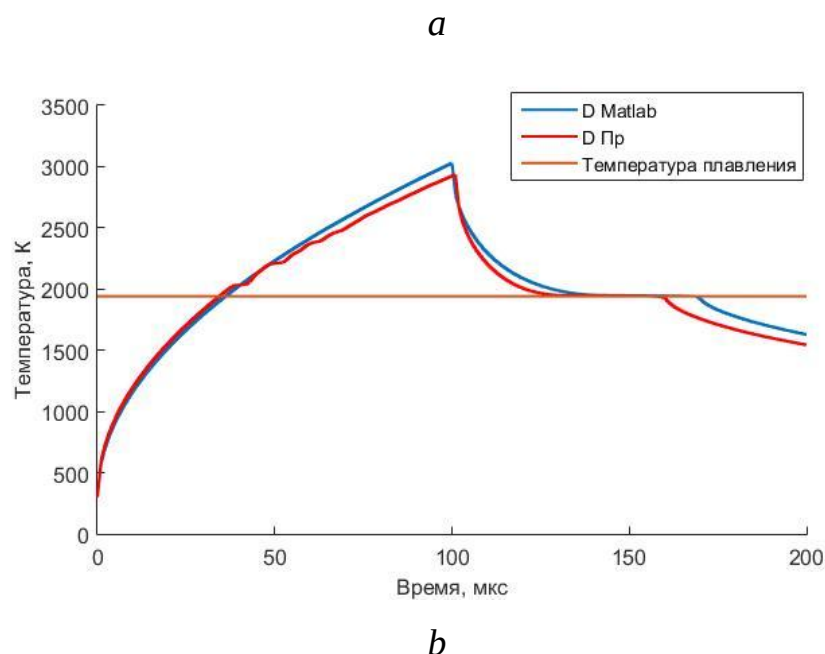


Fig. 10. Changing the surface temperature of the specimen titanium;

$$a - s = 50, b - s = 5$$

It is seen from the figure that, the larger the smoothing parameter s , the smaller the phase transition shelf during crystallization.

Consider the calculation of the surface temperature for different methods of calculating the phase transition. In figure 11 shows the surface temperature of a titanium specimen with a pde-Matlab solver. In addition to the E_Matlab hike with a counter and correction, this hike is solved by running; energy density J/cm², pulse duration $t_0 = 100 \mu\text{s}$. In figure 12 shows the variation of the surface temperature of specimen of a titanium by the tridiagonal matrix algorithm.

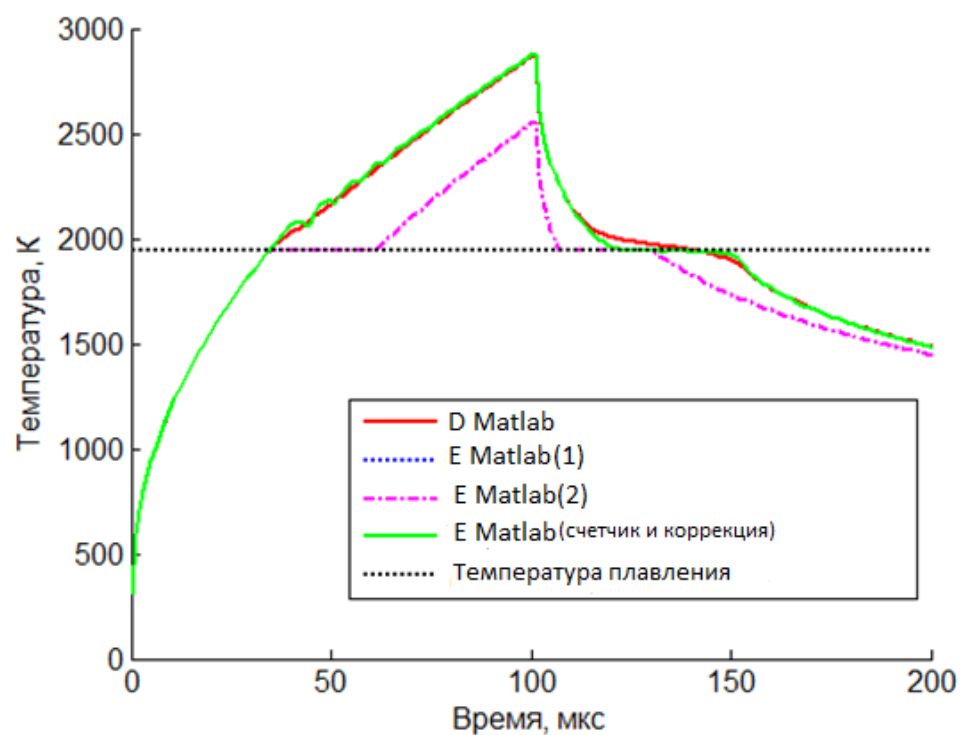


Fig. 11. Surface temperature of the specimen titanium solver pde-Matlab;
 $E_0=20 \text{ J/cm}^2$, $t_0=100 \text{ μs}$

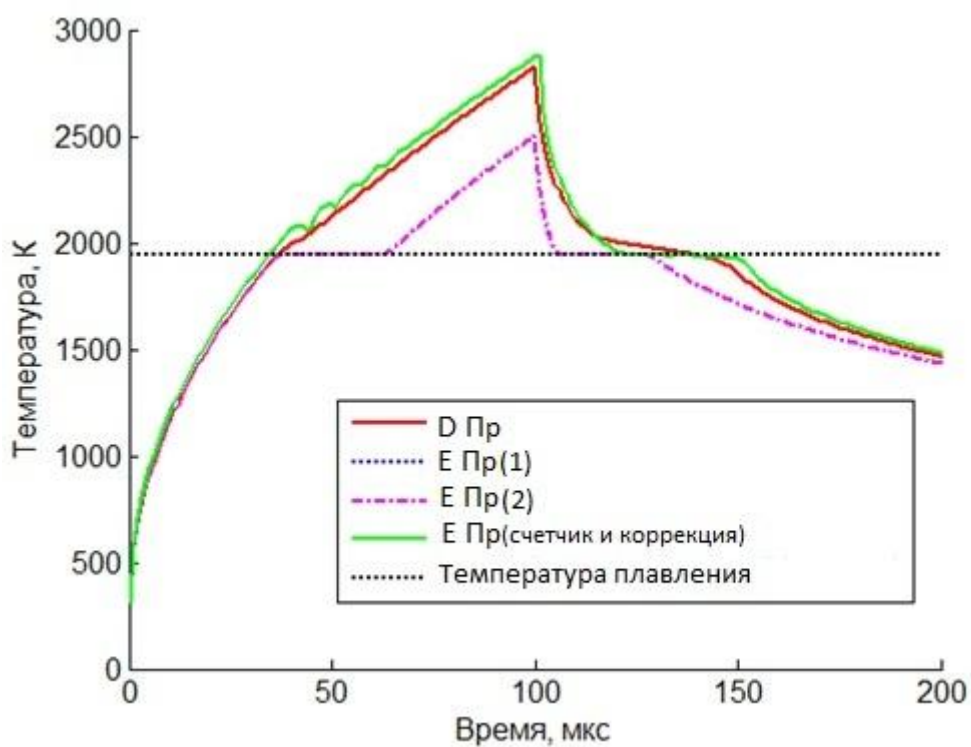


Fig.12. Surface temperature of the specimen titanium the tridiagonal matrix
 algorithm

From fig. 11 and fig. 12 that the surface temperature is calculated using the pde-Matlab method and the tridiagonal matrix algorithm, which gives similar results, except for E Matlab (2), where the phase transition is described in the form (1.4.7-1.4.8).

We will calculate the surface temperature of titanium and experimental measurement [5].