

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

Институт: Физико-технический
Направление подготовки: Техническая физика
Кафедра: Экспериментальной физики

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ СЕКЦИОНИРОВАННОГО КАЛОРИМЕТРА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПО СЕЧЕНИЮ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

УДК 536.621:537.533

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0Д31	Серебренников М. А.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник, Лаборатория №1	Егоров И. С.	К.Т.Н		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Верховская М. В.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры ПФ	Гоголева Т.С.	К.Ф.-М.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭФ ФТИ	Кривобоков В.П.	д.ф.-м.н., профессор		

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



Физико-технический институт
Направление подготовки: Техническая физика
Кафедра: Экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
ОД31	Серебренникову Максиму Анатольевичу

Тема работы:

Разработка и испытания секционированного калориметра для изучения распределения энергии по сечению электронного пучка	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<ol style="list-style-type: none">1. Импульсный ускоритель электронов «Астра-М»;2. Тепловизор FlukeTi10;3. Медь М1, лист 600x100 мм, толщина 1 мм;4. Кювета медная;5. Стекло CaF₂;6. Оргстекло блочное, 1 кг.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none">1. Аналитический обзор литературных источников с целью выяснения основных процессов, происходящих в веществе под действием электронного пучка, и определения достижений мировой науки и техники в области калориметрической диагностики электронных пучков;2. Постановка цели и задач научного исследования;3. Разработка и испытания секционированного калориметра;4. Обсуждение результатов проведенных исследований;5. Заключение по проделанной работе.
Перечень	<ol style="list-style-type: none">1. Разработка и испытания секционированного калориметра

графического материала	<p>для изучения распределения энергии по сечению электронного пучка;</p> <ol style="list-style-type: none"> 2. Актуальность; 3. Концепция секционированного коллектора калориметра; 4. Цель и задачи работы; 5. Проектирование калориметра; 6. Глубина проникновения электронов, нагрев одной ячейки за один импульс; 7. Время установления теплового равновесия между противоположными сторонами секции; 8. Сборка секционированного калориметра; 9. Калибровка показаний тепловизора при использовании CaF₂ стекла; 10. Основные характеристики ускорителя; 11. Постановка эксперимента; 12. Результаты; 13. Заключение.
-------------------------------	---

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент кафедры менеджмента, Верховская М.В.
Социальная ответственность	Ассистент кафедры прикладной физики, Гоголева Т.С.

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Научный сотрудник, Лаборатория №1	Егоров И.С.	К.Т.Н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОД31	Серебренников М. А.		

**Результаты обучения бакалавров
направления 16.03.01 «Техническая физика»
(профиль «Пучковые и плазменные технологии»)**

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P1	Использовать фундаментальные законы природы и естественнонаучных дисциплин, физико-математический аппарат, методы математического анализа, моделирования, оптимизации и статистики для решения задач в различных отраслях технической физики.	Требования ФГОС (ПК-2, 3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P2	Участвовать в теоретических и экспериментальных исследованиях в различных отраслях технической физики, связанных с современными высокотехнологическими способами обработки материалов, основанными на использовании радиационных и плазменных потоков; самостоятельно осваивать современную физическую аналитическую и технологическую аппаратуру, применять современные методы исследования свойств материалов и различных структур, проводить стандартные и сертификационные испытания технологических процессов, оборудования и изделий, изучать научно-техническую информацию, разрабатывать адекватные физические и математические модели изучаемых объектов.	Требования ФГОС (ПК-4, 10, 11, 12, 13). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P3	Владеть основными методами работы с информацией, самостоятельно работать на компьютере в средах современных операционных систем и наиболее распространенных прикладных программ и программ компьютерной графики, применять современные образовательные и информационные технологии.	Требования ФГОС (ПК-5, 6, 7). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P4	Знать иностранный язык на уровне, позволяющем работать с научно-технической литературой и участвовать в международном сотрудничестве в области технической физики.	Требования ФГОС (ПК-8). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P5	Участвовать в производственно-технологической деятельности, определять основные параметры технологических процессов, анализировать свойства физико-технических объектов, изделий и материалов, применять современные информационные технологии, пакеты прикладных программ для расчета технологических параметров, обосновывать принятие конкретного технического решения при разработке технологических процессов и изделий.	Требования ФГОС (ПК-14, 15, 17). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P6	Использовать нормативные документы по качеству, стандартизации и сертификации изделий, элементы экономического анализа производственно-технологических циклов, знать и выполнять правила техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности и нормы охраны труда.	Требования ФГОС (ПК-16, 18). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P7	Участвовать в проектно-конструкторской деятельности, разрабатывать функциональные и структурные схемы элементов и узлов экспериментальных и промышленных электрофизических установок, реализующих современные пучковые и плазменные технологии, проектировать	Требования ФГОС (ПК-19, 20). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	технологические процессы и оборудование с использованием современных информационных технологий.	EUR-ACE и FEANI
P8	Участвовать в организационно-управленческой деятельности, уметь работать в команде и организовывать работу исполнителей, находить и принимать управленческие решения.	Требования ФГОС (ОК-3, ПК-21, 22, 23). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Внедрять и коммерциализировать результаты исследований и проектно-конструкторских разработок, уметь оценивать инновационный потенциал новой продукции в области современных технологий, основанных на использовании радиационных и плазменных потоков.	Требования ФГОС (ПК-21, 22, 23, 24). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
<i>Универсальные компетенции</i>		
P10	Осознавать социальную значимость своей профессии, развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, в течение всей жизни самостоятельно обучаться новым методам исследований, пополнять свои знания в области современной технической физики и смежных наук, расширять и углублять свое научное мировоззрение, повышать свою квалификацию и мастерство, поддерживать здоровый образ жизни	Требования ФГОС (ОК-1, 2, 6, ПК-1). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Свободно и грамотно пользоваться русским и иностранными языками как средством делового и профессионального общения, владеть навыками публичной дискуссии, создавать и редактировать тексты профессионального назначения.	Требования ФГОС (ОК-2). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P12	Уметь критически переосмысливать свой накопленный социальный и профессиональный опыт, изменять при необходимости профиль своей профессиональной деятельности, следовать этическим и правовым нормам и нести ответственность за последствия своей профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ОК-5, 7, ПК-3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

Реферат

Выпускная квалификационная работа представлена на 89 листах машинописного текста, включает 23 иллюстрации, 27 таблиц, 32 источников литературы.

Ключевые слова: секционированный калориметр, импульсный электронный пучок, тепловизионная диагностика, термограмма.

Объектом исследования является секционированный калориметр, состоящий из крепежных фланцев, пластиковой сетки со встроенной в нее матрицей медных ячеек.

Целью данной работы является разработка и испытание секционированного калориметра для изучения распределения энергии по сечению электронного пучка.

В процессе исследования проводились расчеты основных параметров калориметра, его калибровка, сборка и последующие эксперименты с использованием импульсного электронного ускорителя. Проводилась оценка возможности эксплуатации данного устройства.

В результате исследования был рассчитан, откалиброван, собран, а также испытан секционированный калориметр, были сделаны выводы о целесообразности его применения.

Оглавление

Реферат	6
Введение.....	9
Глава 1. Калориметрическая диагностика сильнооточного электронного пучка	11
1.1. Задачи диагностики	11
1.2. Основные явления при облучении объекта электронным пучком	13
1.3. Глубина проникновения электронов	15
1.4. Теплопроводность и излучение.....	19
1.5. Некоторые разработки в области калориметрической диагностики электронного пучка	19
Глава 2. Метод тепловизионной диагностики распределения энергии импульсного электронного пучка и оборудование для проведения экспериментов с калориметром.....	27
2.1. Метод тепловизионной диагностики	27
2.2. Оборудование для проведения экспериментов с секционированным калориметром	29
2.2.1. Импульсный ускоритель электронов «Астра-М»	29
2.2.2. Тепловизор Fluke Ti10	31
Глава 3. Разработка и испытания секционированного калориметра.....	34
3.1. Расчет основных характеристик секционированного калориметра.....	34
3.2. Сборка и калибровка секционированного калориметра	38
3.3. Постановка эксперимента	41
3.4. Результаты	43
Глава 4. Социальная ответственность	48
4.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов	48
4.2. Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на импульсном ускорителе электронов «Астра – М» и ПЭВМ	51
4.2.1. Организация безопасной работы	51
4.2.2. Организация рабочего места оператора ПЭВМ	51
4.2.3. Безопасные условия работы	53
4.4. Электробезопасность.....	59
4.5. Пожарная и взрывная безопасность.....	61
4.6. Выводы по разделу «Социальная ответственность»	63
Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	66
5.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	66
5.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования.....	66

5.1.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	67
5.1.3. SWOT анализ	68
5.2. Планирование научно-исследовательских работ	70
5.2.1. Структура работ в рамках научного исследования.....	70
5.2.2. Разработка графика проведения научного исследования	71
5.3. Бюджет научно-технического исследования	73
5.3.1. Затраты на расходные материалы.....	74
5.3.2. Затраты на персонал	74
5.3.3. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	76
5.3.4. Накладные расходы	76
5.4. Оценка научно-технического эффекта	77
5.5. Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	80
Заключение	82
Список публикаций.....	83
Список использованных источников	84
Приложение А	88

Введение

Ускорители электронов прямого действия в настоящее время широко используются в качестве источников ионизирующего излучения в промышленности, медицине, для решения экологических задач. Этому способствуют высокие показатели эффективности и безопасности технологических процессов с применением ускорителей. Уровень развития ускорителей непрерывного действия с энергией электронов порядка нескольких МэВ и высокой, сотни кВт мощностью, достиг промышленного применения. Активно развиваются прикладные применения малогабаритных ускорителей импульсного действия [1].

Различные производственные процессы или исследования с применением электронных ускорителей требуют различной конфигурации пучка. Таким образом, возникает проблема оценки распределения энергии пучка в плоскости, перпендикулярной направлению пучка.

На данный момент используются различные способы диагностики пучка, такие как облучение калориметров, дозиметрических пленок и т.д. Существуют различные типы калориметров: интегральные (полного поглощения), фольговые, использования материала с низкой объемной плотностью и низкой теплопроводностью в качестве мишени. Однако такие калориметры имеют ряд недостатков, которые ограничивают их применение для решения данного вопроса.

Тем не менее, использование так называемого секционированного калориметра может решить данную задачу. Принцип построения данного устройства основывается на использовании матрицы чувствительных элементов, теплоизолированных друг от друга. Данные чувствительные элементы, получая энергии при облучении их электронным пучком, нагреваются. По нагреву элементов по отдельности можно судить о плотности энергии в сечении пучка.

И в связи с выше изложенным, целью выпускной квалификационной работы является создание секционированного калориметра для оценки распределения энергии пучка по сечению импульсного электронного пучка.

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие задачи: определить конструкцию калориметра, рассчитать основные параметры, такие как максимальный пробег электронов в ячейках калориметра, температура нагрева ячеек за один импульс, тепловые потери с поверхности ячеек за счет теплопроводности, излучения, конвекции, время уравнивания температуры на противоположных сторонах ячейки после облучения электронным пучком. Далее необходимо изготовить, собрать, и откалибровать секционированный калориметр. Последний этап создания состоит в испытании данного калориметра в различных условиях с использованием импульсного электронного ускорителя «Астра-М», анализе полученных результатов.

Глава 1. Калориметрическая диагностика сильнооточного электронного пучка

1.1. Задачи диагностики

Все разнообразие современных ускорителей можно разделить на два класса — циклические и линейные ускорители. В циклических ускорителях пучок заряженных частиц движется по замкнутой траектории в течение длительного (по сравнению с периодом обращения) времени. В линейных — пучок однократно пролетает ускоряющую структуру и затем выводится из ускорителя.

В ускорителях разных типов пучки заряженных частиц подвергаются группировке, фокусировке, ускорению, охлаждению, транспортировке из одной части установки в другую и т. п. Эти операции над пучками частиц выполняются при помощи согласованной работы совокупности прецизионных электромагнитных устройств, таких как поворотные дипольные и фокусирующие квадрупольные магниты, электростатические отклоняющие устройства, ускоряющие высокочастотные резонаторы, импульсные кикеры и др. Компоненты современного ускорителя заряженных частиц являются высокотехнологичными устройствами, уровень которых близок к пределу технических и экономических возможностей производства.

Воздействие внешних возмущений и не идеальность самих ускорителей приводит к тому, что движение пучка частиц в реальном ускорителе в большей или меньшей степени отличается от расчетного, поэтому возникает необходимость постоянного контроля параметров пучка. Для обеспечения требуемого качества пучка производится коррекция параметров ускорителя по конечному эффекту — изменению измеряемых параметров пучка в нужную сторону. Такая коррекция может производиться как вручную, оператором, так и в автоматическом режиме с помощью различных систем обратной связи.

Ниже приведен далеко не полный список типичных задач ускорительной физики, так или иначе связанных с измерениями параметров пучка, достаточно условно разбитый на три этапа.

1. Ввод в эксплуатацию нового или модернизированного ускорителя:

- проводка пучка по каналам транспортировки;
- измерение и согласование эмиттанса пучка и акцептанса ускорителя;
- наблюдение и коррекция траектории пучка на первом обороте;
- контроль пучка в процессе настройки инжекции и захвата ускоряющим ВЧ-полем.

2. Оперативное управление установкой в процессе регулярной работы. На данном этапе необходимо рутинное измерение и коррекция следующих параметров:

- равновесная орбита пучка;
- бетатронные и синхротронная частоты;
- хроматизм;
- поперечный и продольный размеры пучка;
- связь бетатронных колебаний;
- средняя энергия и энергетический разброс частиц пучка;
- светимость (в коллайдерах).

3. Задачи ускорительной физики, необходимые для оптимизации работы установки:

- измерение и коррекция структурных функций;
- изучение нелинейной динамики пучка;
- исследование коллективных эффектов и подавление неустойчивостей;
- анализ внешних возмущений движения пучка.

Как отдельная немаловажная задача может рассматриваться контроль работоспособности и калибровка самих систем диагностики пучка, а также их исследование в процессе работы с целью улучшения точности, долговременной стабильности, надежности и т. д [2].

Для измерения распределения энергии импульсного электронного пучка в поперечном сечении и энергии перенесенной пучком на мишень может служить калориметрический метод измерения данных характеристик, основанный использовании некоторого материала в качестве поглотителя тепла (мишени) и дальнейший расчет поглощенной энергии с учетом разности температур мишени до и после облучения.

1.2. Основные явления при облучении объекта электронным пучком

Под действием ускоряющего напряжения U_B в электростатическом поле источника электронов последние ускоряются до скорости V_e (рис. 1.1).

У технологических электронно-лучевых установок ускоряющие напряжения обычно лежат в пределах 10-150 кВ. Для химических электронно-лучевых процессов чаще требуются ускоряющие напряжения около 300 кВ, реже - 1 МВ и выше. В диапазоне энергий 10-150 кВ скорость электронов составляет 0,2-0,6 скорости света. Релятивистские эффекты следует учитывать при ускоряющих напряжениях свыше 100 кВ. При ускорении до V_e в электростатическом поле электрон приобретает кинетическую энергию:

$$E = \frac{m_{e0}}{2} V_e^2 \left(1 + \frac{3 V_e^2}{4 c^2} + \frac{5 V_e^4}{8 c^4} + \dots \right) = eU_B \quad (1.1)$$

где m_{e0} - масса покоя электрона; e - его заряд; c - скорость света.

В зоне встречи пучка с объектом (зоне действия пучка) он бомбардирует объект; кинетическая энергия электронов при

взаимодействиях с атомами превращается в тепловую энергию или в энергию возбуждения атомов и молекул.

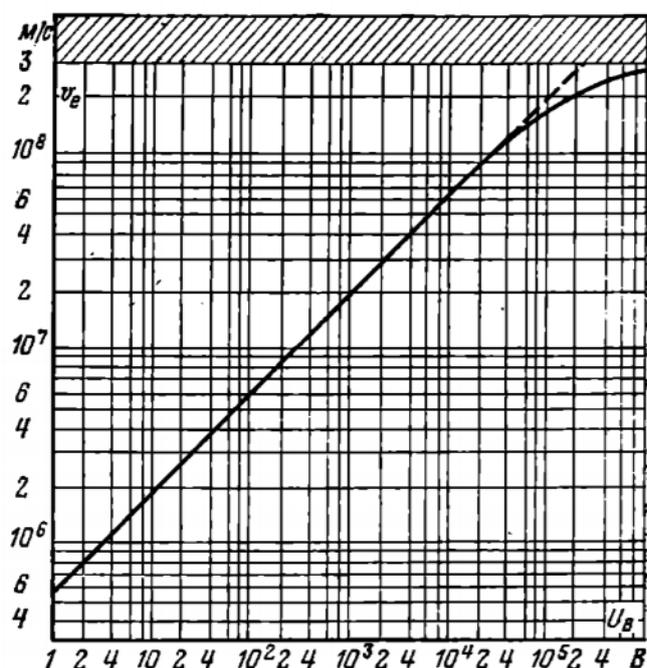


Рисунок 1.1 - Скорость V_e электронов, прошедших электрическое поле с ускоряющим напряжением U_B [3]. Заштрихована область скорости света.

Часть электронов пучка отражается и рассеивается поверхностью объекта, а в результате вторичных процессов возникают вторичные электроны, рентгеновское излучение и во многих случаях - тепловые электроны. Возникающее тепло повышает температуру в зоне действия пучка, и появляются потоки от места преобразования энергии в окружающую среду, в том числе поток теплового излучения от нагретой поверхности объекта (рис. 1.2) [3].

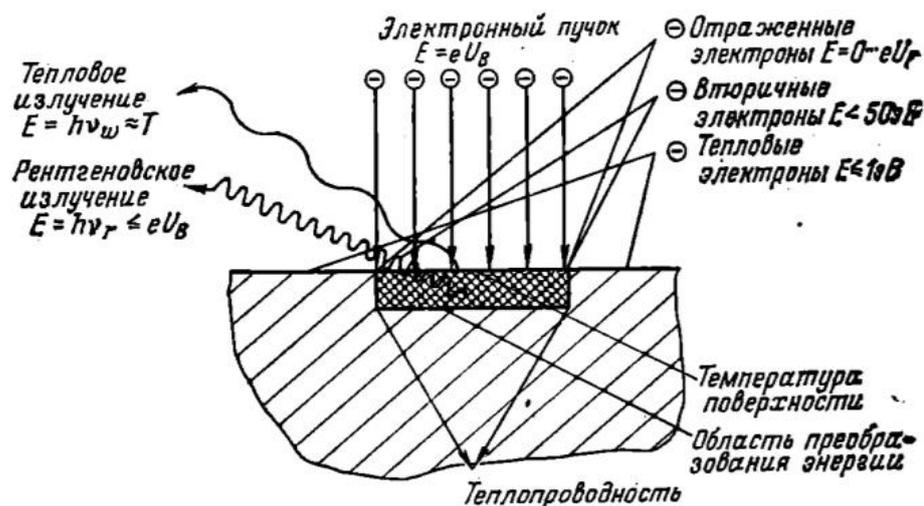


Рисунок 1.2 - Явления при бомбардировке объекта электронным пучком [3].

Возникающее в зоне действия пучка тепло, а также возбуждение им атомов и молекул лежат в основе всех способов электронно-лучевой технологии. Теплоотвод излучением же является основным процессом, который используется в тепловизионной диагностике параметров электронного пучка, которая является одним из типов калориметрической диагностики.

1.3. Глубина проникновения электронов

Для наиболее полной реализации метода калориметрической диагностики пучка необходимо, чтобы все электроны поглотились в толще материала.

Проникая при бомбардировке мишени внутрь её материала, электроны пучка испытывают многочисленные упругие и неупругие столкновения с атомами и молекулами вещества, отдавая им свою энергию и отклоняясь от своего первоначального направления. Обладая массой, гораздо меньшей, чем атом или молекула, электрон при каждом столкновении отдает им очень малую долю своей энергии. Поэтому для того, чтобы электрон

отдал частицам мишени всю свою энергию, требуется очень большое число столкновений [4].

За глубину проникновения S электронов пучка принимают расстояние по нормали от поверхности мишени в глубь нее, на котором электроны теряют практически всю свою энергию. Она зависит только от энергии электронов и плотности материала (рис. 1.3). Вследствие зависимости вероятности столкновений энергии электронов для различных интервалов энергии получаются разные аналитические выражения. С приближением, достаточным для целей электронно-лучевой технологии, эти зависимости имеют вид [5]:

$$S \approx 2,1 \cdot 10^{-12} \frac{U_B^2}{\rho} (10 \text{ кЭВ} \leq eU_B \leq 10 \text{ кЭВ}); \quad (1.2)$$

$$S \approx 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{U_B^{5/3}}{\rho} (100 \text{ кЭВ} \leq eU_B \leq 1 \text{ МэВ}); \quad (1.3)$$

$$S \approx \frac{1}{\rho} (5,1 \cdot 10^{-7} U_B - 0,26) (eU_B \geq 1 \text{ МэВ}), \quad (1.4)$$

где S - глубина проникновения, см; U_B - ускоряющее электроны напряжение, В; ρ - плотность материала, г/см³.

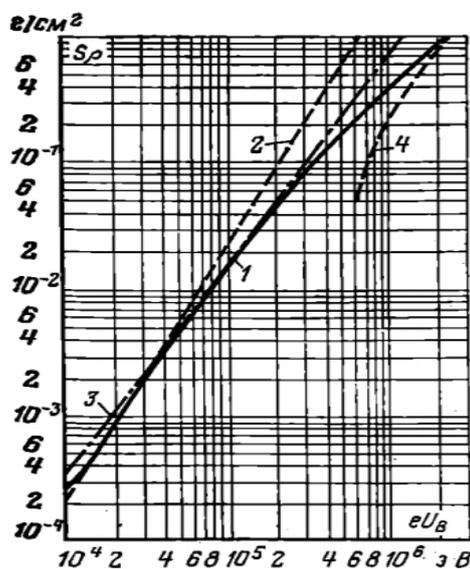


Рисунок 1.3 - Произведение глубины проникновения электронов S на плотность материала мишени ρ в зависимости от энергии электронов eU_B .
 1 - измерения [4]; 2 - приближение по уравнению (1.2); 3 - приближение по уравнению (1.3); 4 - приближение по уравнению (1.4) [5].

Например, для стали ($\rho=7,8 \text{ г/см}^3$) при $U_B=10 \text{ кВ}$ $S=0,27 \text{ мкм}$, а при 100 кВ $S=27,0 \text{ мкм}$. Следовательно, энергия электронного пучка преобразуется в тепло внутри очень тонкого поверхностного слоя мишени.

Таблица 1.1 - Эффективные пробеги электронов (в см) в различных веществах в зависимости от их энергии[6]

Вещество	Энергия электронов, МэВ				
	0,05	0,5	5	50	500
Воздух	4,1	160	$2 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^4$	$6,3 \cdot 10^4$
Вода	$4,7 \cdot 10^{-3}$	0,19	2,6	19	78
Алюминий	$2 \cdot 10^{-3}$	0,056	0,95	4,3	8,6
Свинец	$5 \cdot 10^{-4}$	0,026	0,30	1,25	2,5

Передача энергии по мере проникновения электрона вглубь вещества происходит неравномерно [7, 8]. Поэтому мощность, поглощаемая в единице объема вещества, является функцией расстояния от поверхности. Как показывает рис. 1.4, эта функция в широких пределах не зависит от энергии электронов в пучке; её можно приближенно описать выражением [9]:

$$\frac{p_A(z)}{p_{Amax}} = 1 - \frac{9}{4} \left(\frac{z}{S} - \frac{1}{3} \right)^2, \quad (1.5)$$

Здесь $p_A(z)$ - удельная объемная мощность, поглощаемая материалом мишени, в зависимости от расстояния z от ее поверхности; $p_{Amax}(z) = 4/3 \cdot \eta_A \cdot U_B \cdot j$ - максимальное значение p_A на расстоянии $z=S/3$ от поверхности мишени; S - глубина проникновения электронов; j - плотность тока пучка в месте его встречи с поверхностью мишени; η_A - доля поглощенной мощности от поступающей на поверхность мишени мощности пучка.

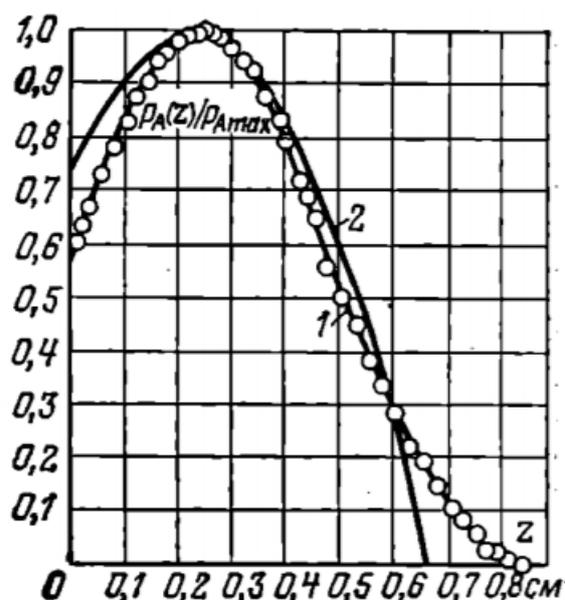


Рисунок 1.4 - Зависимость удельной объемной мощности p_A поглощаемой материалом мишени, приведенная к ее максимальному значению p_{Amax} от глубины z под поверхностью мишени.

Материал - полиэтилен ($\rho = 0,94 \text{ г/см}^3$), $eU_B = 1,5 \text{ МэВ}$; 1 - измерения; 2 - приближение по уравнению (1.5) [7].

Характерно, что на расстоянии от поверхности, равном $1/3$ глубины проникновения электронов, поглощаемая мощность достигает максимума и затем спадает до нуля на расстоянии, равном глубине проникновения. Для тепловизионной диагностики такая неравномерность поглощения энергии не играет роли, так как вызываемая ею в пределах глубины проникновения разность температур быстро выравнивается под действием теплопроводности. Для различных нетермических процессов, у которых желаемый технологический эффект непосредственно связан с энергией, поглощаемой в единице объема, ее зависимость от глубины, наоборот, может оказать существенное влияние на выбор способа осуществления процесса.

Если диаметр электронного пучка, бомбардирующего объект, мал по сравнению с глубиной проникновения электронов, то наряду с зависимостью удельной объемной энергии от глубины появляется еще и ее зависимость от радиуса. Из-за рассеяния электронов, связанного с процессами их столкновений, объем, в котором происходит преобразование энергии,

оказывается большим, чем объем, определяемый диаметром пятна пучка на поверхности объекта и глубиной проникновения электронов. Отсюда вытекает, что сделать размеры зоны, непосредственно обрабатываемой электронным пучком, произвольно малыми путем уменьшения диаметра пучка - невозможно [10].

1.4. Теплопроводность и излучение

В термических процессах калориметрической диагностики в общем случае решающую роль играет энергия электронного пучка, преобразуемая в ходе описанных выше взаимодействий в тепло. Потери тепла происходят за счет теплопроводности и излучения (см. рис. 1.2). В зависимости от плотности мощности те или другие потери могут быть преобладающими. Например, при калориметрической диагностике пучка с малой плотностью мощности потерями на излучение можно пренебречь и считать, что потери тепла определяются только теплопроводностью. При диагностике пучков с высокими плотностями мощности, потери тепла излучением могут значительно превысить потери теплопроводностью. В последнем случае теплопроводность и излучение могут решающим образом повлиять на тепловой КПД всего процесса [11].

1.5. Некоторые разработки в области калориметрической диагностики электронного пучка

В наши дни широкое применение получили импульсные электронные пучки с высокой однородностью плотности энергии по сечению. Калориметрический метод диагностики пучка является одним из перспективных методов для измерения распределения энергии импульсного электронного пучка в поперечном сечении и энергии перенесенной пучком на мишень, так как имеет возможность регистрации нагрева мишени после

окончания действия помех, сопровождающих работу ускорителя, а также малые размеры чувствительного элемента, что существенно из-за неоднородности излучения в сечении пучка.

В работе [12] представлены результаты экспериментов с использованием калориметра полного поглощения. Данный калориметр изготавливался для диагностики пучков длительностью до 90 нс с энергией электронов до 5.2 МэВ. Была разработана конструкция, схема которой представлена на рис. 1. 5.

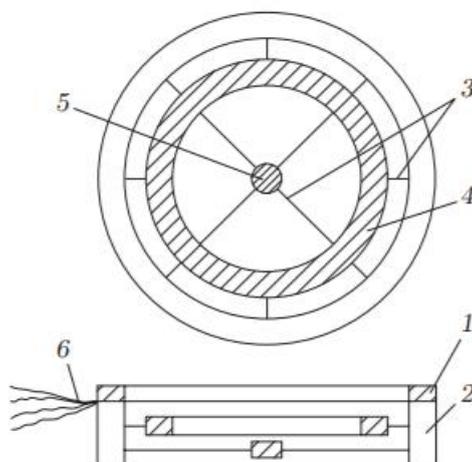


Рисунок 1.5 - Схема кольцевого калориметра: 1 — стальное кольцо; 2 — корпус; 3 — растяжки; 4 — кольцевой калориметр; 5 — центральный калориметр; 6 — термопары [12].

Заземленное кольцо (1) предназначено для защиты корпуса от действия электронов. Кольцевой (4) и центральный калориметр (5) изготавливались из стали марки ст.3 толщиной 0,3 см. Радиус центрального калориметра 0,3 см. Внутренний радиус кольца 2,04; 2,25 см, внешний – 2,6; 2,85 см. Растяжки (3) изготовлены из стальной проволоки диаметром 0,4 мм. В центральный калориметр запрессована одна термопара, в кольцевой — четыре (равномерно по окружности).

Изменение температуры калориметров регистрировалось с помощью самопишущих потенциометров ЭПП-09М3 или миллиамперметров постоянного тока Н-37 с усилителем И-37. При этом термоЭДС термопар измерялась примерно через 1 с после облучения электронами.

Для определения доли энергии электронов, поглощенной в материале калориметра, методом Монте-Карло по программе MCNP4A были проведены расчеты распространения электронов в телах разной формы из железа. В качестве тел рассматривались кольца и диски из стали, такой же формы и размерами как изготовленные калориметры. Источник электронов представлял собой плоскость, параллельную торцевой поверхности тела, и располагался на расстоянии 100 см от нее. Направление вылета электронов совпадало с направлением нормали к поверхности тела.

Для определения температуры T калориметра в месте размещения термопары по измеренному значению термоЭДС использовался аппроксимирующий полином. Была установлена зависимость между средней по объему калориметра температурой в момент окончания электронного импульса и поглощенной в калориметре энергией электронов.

Предложенная конструкция калориметра позволила измерять величину переноса энергии электронов до $(2,0 \div 2,5) \cdot 10^2$ Дж/см². Конструкция оказалась достаточно удобной в эксплуатации с точки зрения ее стойкости к действию электронного пучка и использования в виде отдельного цельного узла. Однако некоторую сложность представляет замена отдельных компонентов конструкции. Ее можно вставлять в устройство для облучения образцов, производить замену в случае повреждения при многократном использовании вблизи предельных значений переноса энергии и т. д.

Несмотря на все плюсы данного калориметра, такой тип конструкции не позволяет однозначно оценить распределение энергии в поперечном сечении пучка. Может быть определена средняя температура всего объема калориметра, но не отдельных его участков.

Похожий образец калориметра использовался в [1] для оценки энергии, переносимой электронным пучком за анод вакуумного электронного диода.

Работы [13], [14], [15] являются развитием одного метода – использования материала с низкой объемной плотностью и низкой теплопроводностью в качестве мишени для бомбардировки электронным пучком, измерения нагрева мишени тепловизором и дальнейшего расчета характеристик. Исследования были проведены с использованием импульсного электронного ускорителя ТЭУ-500. Основные параметры ускорителя: энергия электронов: до 550 кэВ; выведенный ток электронов: 6.5 кА; длительность импульса (на полувысоте): 60 нс; частота следования импульсов: до 5 имп./с; энергия в импульсе: до 200 Дж [16].

Для измерения распределения плотности энергии импульсного электронного пучка по сечению и энергетического спектра электронов в пучке использовалось измерение теплового отпечатка электронного пучка в пенопласте.

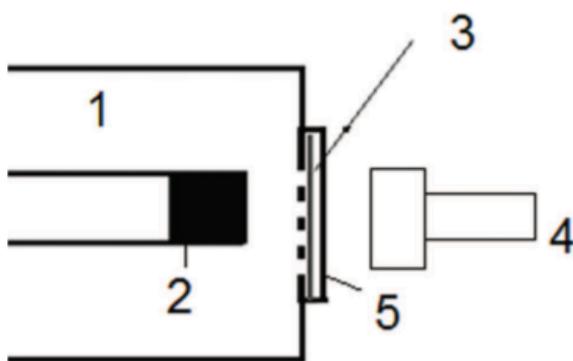


Рисунок 1.6 - Схема эксперимента: 1 — диодная камера; 2 — катод; 3 — анодная решетка и алюминиевая фольга; 4 — тепловизор; 5 — пенопласт [15].

Для измерения энергетического спектра электронов в образце из пенопласта предварительно сделали разрезы вдоль мишени пополам для снятия теплового отпечатка. После облучения мишени импульсным пучком разрезанный пенопласт открывали и снимали тепловое изображение на тепловизор. Типичное распределение температуры показано на рис. 1.7.

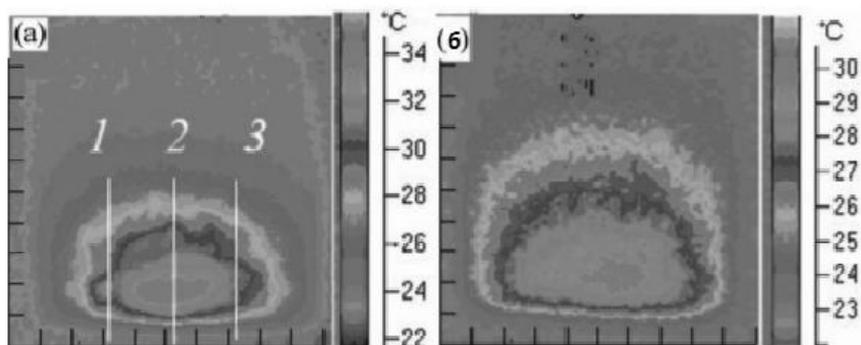


Рисунок 1.7 – Термограммы мишени при различных анод-катодных промежутках: а — 10,5 мм; б — 16 мм. Каждое деление шкалы соответствует 10 мм [15].

Также были сделаны и поперечные термограммы мишени (Рис 1.8).

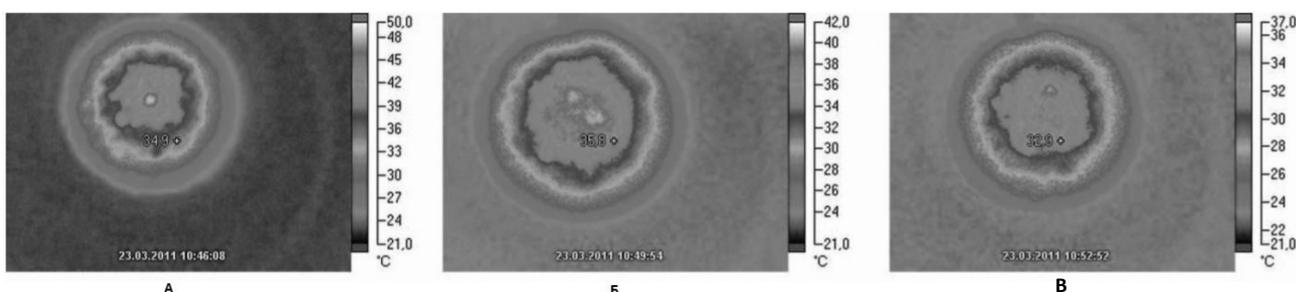


Рисунок 1.8 – Поперечные термограммы мишени на разной глубине: а — 8 мм; б — 16 мм; в – 24 мм [15].

По данным распределения температуры по глубине пенопласта были определены распределение температуры и рассчитана поглощенная доза в горизонтальной проекции и вертикальной проекциях.

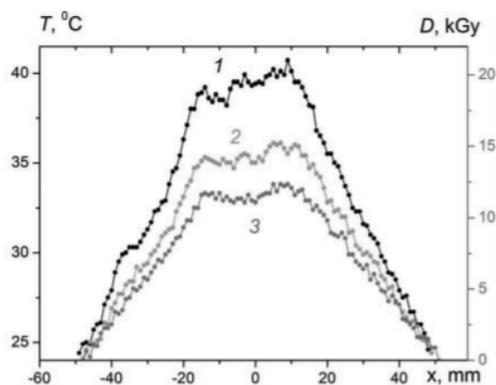


Рисунок 1.9 – Распределение температуры и поглощенной дозы в горизонтальной проекции после облучения: 1 — 2 с; 2 — 11 с; в – 18 с [15].

Разработанная методика позволяет определить энергетический спектр электронов, генерируемых с разных точек катода, с пространственным разрешением 1-2 мм. Пространственное разрешение тепловизионной диагностики составило 0,9 мм, чувствительность тепловизора Fluke Ti10 обеспечивает регистрацию теплового отпечатка за один импульс при плотности тока 0.1-0.4 кА/см². Энергетической чувствительностью составила не более 0,1 Дж/см².

Этот метод нуждается в большей точности, которая может быть оценена теоретически [17]. Например, при остывании мишени в течении 5 с тепловое излучение с поверхности приведет к ошибке более 2%. Если брать в учет конвективное охлаждение воздухом, то ошибка составит еще большее значение. Этот метод не имеет возможности снятия показаний в реальном времени, задержка в измерении данных неизбежна. Еще одним недостатком такого метода является затруднительный анализ полученных данных, так как оценка распределения энергии по сечению пучка требует анализа пространственного отпечатка по всему объему пенопласта.

В работе [18] для калориметрической диагностики электронного пучка с длительностью 80 нс в качестве мишени использовалась 100 мкм вольфрамовая фольга. Энергия электронов в пучке составляла до 450 кэВ, а полный ток пучка до 1 кА. Схема эксперимента представлена на рис.1. 10.

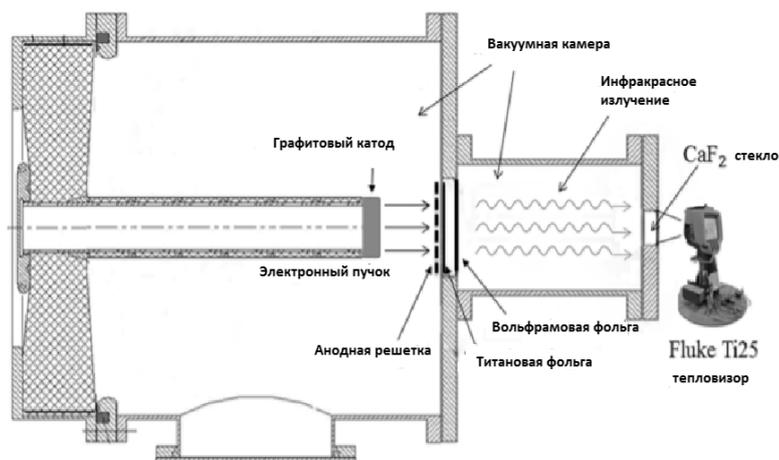


Рисунок 1.10 – Схема эксперимента [18].

Электроны, сгенерированные катодом, ускорились в анодно-катодном промежутке, проходя через анодную фольгу, бомбардировали вольфрамовую мишень, нагревая ее. Тепловое излучение от фольги распространялось через CaF_2 стекло и регистрировалось тепловизором. Как видно и рисунка потери на излучение малы, так как фольговый калориметр находится в разреженной атмосфере.

Результаты экспериментов можно видеть на рис. 1.11.

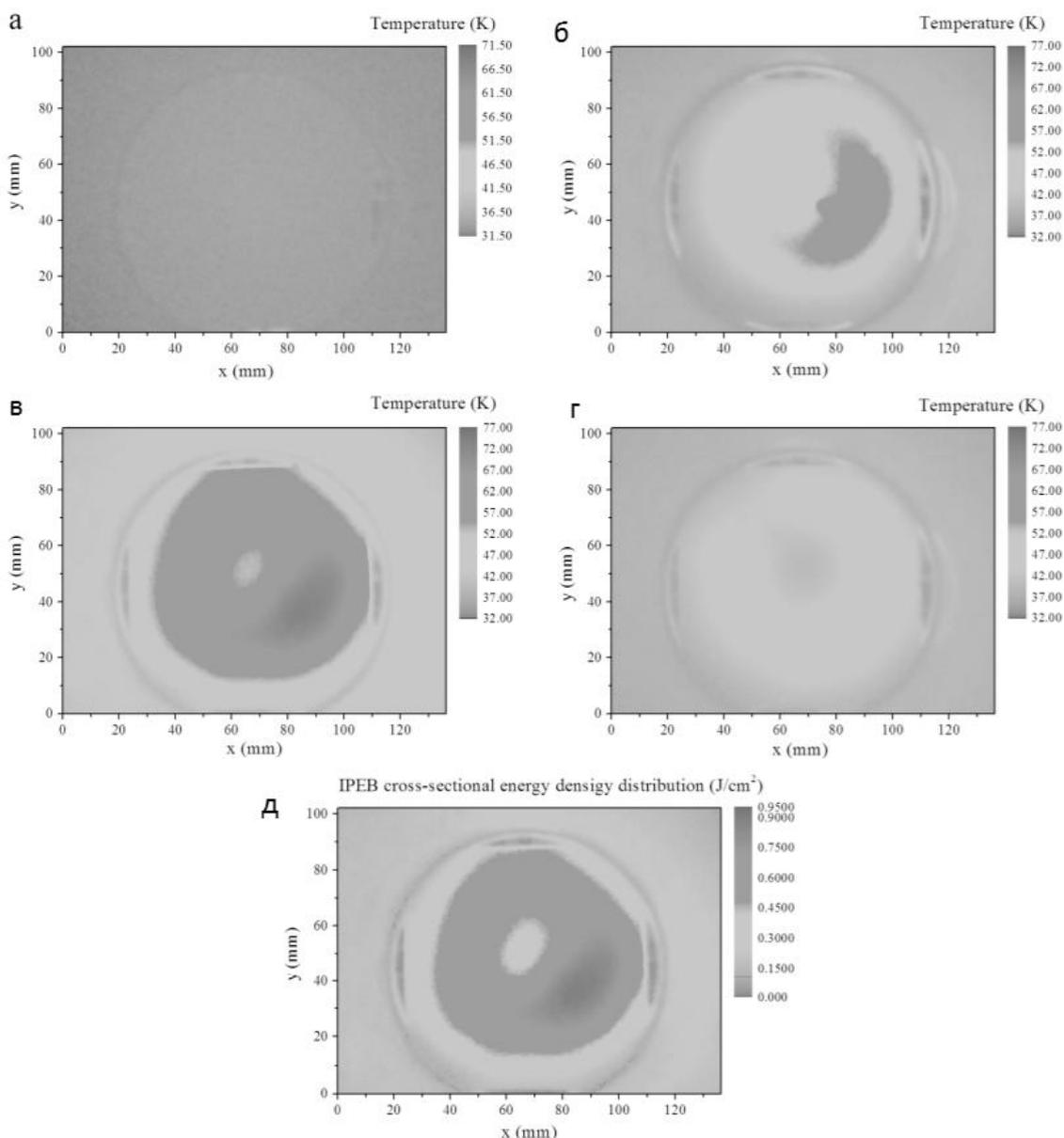


Рисунок 1.11 – Результаты тепловизионных измерений: а – термограмма до облучения, и термограммы с различными анод-катодными промежутками: б – 12 мм, в – 16 мм, г – 18 мм, и д - поперечное распределение энергии рассчитанное с рис. 11.1(в) [18].

Двумерный осесимметричный метод конечных элементов в комбинации с расчетами методом Монте-Карло были использованы для оценки ошибок измерения.

Результаты показали, что данным способом возможно измерять распределение плотности энергии поперечного сечения электронного пучка с энергетической чувствительностью $0,1 \text{ Дж/см}^2$ и пространственным разрешением 1 мм.

Недостатком данного метода является необходимость создания схемы синхронизации моментов облучения вольфрамовой фольги и снятия термограммы тепловизором, так как распространение тепла в фольге происходит с очень большой скоростью. Также этот метод плохо применим при атмосферном давлении вследствие больших конвективных тепловых потерь.

Глава 2. Метод тепловизионной диагностики распределения энергии импульсного электронного пучка и оборудование для проведения экспериментов с калориметром

2.1. Метод тепловизионной диагностики

Основной принцип метода тепловизионной диагностики распределения энергии импульсного электронного пучка является использование некоторого материала в качестве поглотителя тепла (мишени) и дальнейший расчет поглощенной энергии с учетом разности температур мишени до и после облучения. Необходимыми условиями метода являются:

- 1) Толщина мишени должна быть больше, чем максимальный эффективный пробег электронов с заданной энергией в данном веществе;
- 2) Снятие показаний производится после установления теплового равновесия на обеих сторонах мишени;
- 3) Конвективная теплоотдача мала;
- 4) Нет термической абляции.

Для данного метода мишень может быть рассмотрена как совокупность крошечных калориметров, поэтому поверхностное распределение энергии пучка электронов $U(x, y)$ можно рассчитать по следующей формуле:

$$U(x, y) = C_v \cdot d \cdot \rho \cdot \Delta T(x, y), \quad (2.1)$$

где C_v - удельная теплоемкость материала мишени, d - толщина мишени, ρ - плотность мишени, $\Delta T(x, y)$ - изменение температуры до и после облучения. В эксперименте $U(x, y)$ определялось по термограммам мишени.

Из уравнения (2.1), можно сделать вывод, что при той же плотности энергии пучка, более толстая мишень обеспечивает меньший нагрев, что может быть неприемлемо при регистрации данных. Поэтому материал и толщина должны выбираться таким образом, чтобы получить хорошую точность при снятии показаний. Большой пробег электронов ведет к меньшей

плотности распределения энергии в мишени, что делает возможность термической абляции, которая ограничивает применение данного метода, крайне низкой. Однако более низкая плотность мощности может привести к значительному боковому теплообмену. Это приведет к увеличению ошибки в расчетах.

Распределение плотности мощности на мишени может быть записано в виде:

$$P(x, y, z, t) = d(z) \cdot U(x, y) \cdot g(t), \quad (2.2)$$

где $P(x, y, z, t)$ – распределение плотности мощности пучка на мишени, $d(z)$ – нормированное по глубине распределение потери энергии пучка, $U(x, y)$ – поверхностное распределение энергии пучка на мишени, $g(t)$ – нормированное по времени изменение мощности пучка.

Температура T в момент времени t и позиции (x, y, z) может быть вычислена путем решения уравнения теплопроводности Фурье. Дифференциальное уравнение задается как:

$$\rho \cdot C_v \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \nabla^2 T + P \quad (2.3)$$

где ρ – плотность мишени, C_v – удельная теплоемкость материала мишени, λ – теплопроводность мишени.

В качестве начальных условий принимаются:

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (2.4)$$

где T_0 – начальная температура мишени.

Чтобы оценить потери энергии на излучение, в качестве граничных условий принимаются граничные условия Стефана-Больцмана:

$$j = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4) \quad (2.5)$$

где j – поток энергии излучаемой мишенью в окружающую среду, σ – константа Стефана-Больцмана, ε – излучательная способность мишени [17].

2.2. Оборудование для проведения экспериментов с секционированным калориметром

Для изготовления коллектора калориметра использовался 3D принтер «Duplicator 4S», создающим слой за слоем трехмерные объекты из расплавленной нити ABS пластика (Моделирование методом наплавления) [19].

Для расчета средней массы ячеек секционированного калориметра были использованы автоматические электронные весы «XP6U Automated-S» (1 класс точности), цена деления — 0,1 мк, калибровка производилась в автоматическом режиме. Скорость проведения замера составляла менее 10 секунд [20].

2.2.1. Импульсный ускоритель электронов «Астра-М»

В экспериментах по разработке и испытанию секционированного калориметра для исследования распределения энергии по сечению электронного пучка применялся импульсный ускоритель электронов «Астра-М», описанный в работах [1], [21].



Рисунок 2.1 - Внешний вид ускорителя «Астра-М» [1].

Ускоритель электронов «Астра-М» представляет собой комплекс модульных электрических устройств в единой станине, предназначенный для

оборудование сторонних изготовителей. Параметры оригинального оборудования перечислены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Основные параметры входящего в ускорителя электронов «Астра-М» оригинального оборудования[1].

№ п.п.	Наименование параметра	Значение параметра
Источник питания электрофизических нагрузок		
1.	Род питающего напряжения	переменное
2.	Напряжение питания, В	3×380
3.	Частота питающей сети, Гц	50
4.	Максимальная мощность источника (изолированный выход ИПН), кВт	8
5.	Род напряжения на выходе,	импульсное, однополярное
6.	Максимальное напряжение, кВ	регулируемое, до 40
7.	Число изолированных выходов	2
8.	Отклонение напряжения на выходе	±0,5%
Генератор высоковольтных импульсов		
9.	Максимальная мощность генератора, кВт	8
10.	Напряжение питания, кВ	импульсное, до 40
11.	Максимальное напряжение на выходе, кВ	до 500
12.	Род напряжения на выходе	импульсное, однополярное
13.	Максимальная частота, имп./с	50

2.2.2. Тепловизор Fluke Ti10

Для регистрации данных с секционированного калориметра использовался тепловизор Fluke Ti10 (Рис.2.3).



Рисунок 2.3- Внешний вид тепловизора Fluke Ti10 [22].

Данный оснащен технологией IR-Fusion позволяющей получить цифровой фотоснимок в дополнение к инфракрасному изображению и слить два изображения в одно, существенно облегчив анализ ИК-изображений.

Основные характеристики вынесены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Основные характеристики тепловизора Fluke Ti10[22]

Технические характеристики		
Температура	Диапазон температурных измерений (не калибруется ниже -10 °С) Погрешность	от -20 °С до +250 °С ± 2 °С или 2% (большее из этих значений)
Характеристики изображения	Поле зрения Пространственная разрешающая способность (IFOV) Минимальное расстояние фокусировки Фокусировка Частота смены кадров Тип приемника излучения Тип инфракрасного объектива Тепловая чувствительность Спектральный диапазон ИК Фотокамера	23° x 17° 2,5 мрад Объектив тепловизора: 15 см Фотообъектив: 46 см Вручную Частота обновления 9 Гц 160 x 120 матрица в фокальной плоскости микроболометр Объектив 20 мм, F = 0.8 ≤ 0,13 °С при 30 °С (130 м°К) От 7,5 мкм до 14 мкм Разрешение 640 x 480

Обработка термограмм производилась в программном обеспечении SmartView 3.15, предоставляемом вместе с тепловизионным набором. Программное обеспечение SmartView в сочетании с тепловизором позволяет:

- Передавать термографические изображения на компьютер и обрабатывать их;

- Оптимизировать и анализировать контрольные изображения инфракрасного излучения и видимого света;
- Создавать и распечатывать подробные профессиональные отчеты, содержащие важные данные об изображении [22].

Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящей главе была произведена технико-экономическая оценка рыночного потенциала разработанного секционированного калориметра для обоснования перспективности данного направления исследований.

5.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

5.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Данное исследование может быть полезным для диагностики электронных пучков наносекундной длительности.

Секционированный калориметр разрабатывался с целью диагностики электронного пучка в процессе пуско-наладочных и научно-исследовательских работ. Таким образом, деятельность разработчиков секционированного калориметра ориентирована на научно-исследовательские команды, занимающиеся разработкой и выпуском импульсных ускорителей электронов. В России существует много научных коллективов, занимающихся данным вопросом (г. Томск, г. Саров, г. Екатеринбург и др.). Также множество исследований в данной области проводятся и за границей. К числу лидеров иностранных государств по разработке импульсных ускорителей электронов следует отнести США, Китай, Японию.

5.1.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

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

Для проведения анализа конкурентоспособности разработки будет использоваться оценочная карта, приведенная в таблице 5.1. В качестве конкурирующих разработок были приняты: фольговые калориметры – *К1*, калориметры на основе пенопласта – *К2*.

Таблица 5.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	Б _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Возможность проведения дозиметрических исследований	0,2	3	3	5	0,6	0,6	1
2. Возможность определения распределения энергии по сечению пучка	0,2	5	3	5	1	0,6	1
3. Возможность определения энергии вынесенной за анод	0,2	5	5	3	1	1	0,6
4. Возможность определения данных в реальном времени	0,05	5	5	1	0,25	0,25	0,05
5. Удобство обработки данных	0,05	4	3	2	0,2	0,15	0,1
6. Долговечность	0,05	4	5	2	0,2	0,25	0,1
7. Точность	0,2	4	3	4	0,8	0,6	0,8
8. Простота обслуживания	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
Итого	1	35	32	27	4,3	3,7	3,9

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в табл. 5.1, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации. Выбранные критерии

оценки конкурентоспособности методик были обоснованы ранее в разделе литературного обзора.

Итогом данного анализа, действительно способным заинтересовать партнеров и инвесторов, может стать выработка конкурентных преимуществ, которые помогут создаваемому продукту завоевать доверие покупателей посредством предложения товаров, заметно отличающихся либо высоким уровнем качества при стандартном наборе определяющих его параметров, либо нестандартным набором свойств, интересующих покупателя. К главному конкурентному преимуществу производимого продукта, можно отнести возможность точного определения распределения энергии по сечению пучка. Это качество в совокупности с остальными помогут завоевать доверие пользователей путем предложения товара высокого качества со стандартным набором определяющих его параметров.

5.1.3. SWOT анализ

На этапе SWOT-анализа определены сильные и слабые стороны разработки, изучены рыночные возможности во внешней среде, выявлены угрозы. Получено представление об основных направлениях развития проекта, а также о том, как можно использовать сильные стороны, преодолеть слабости, воспользоваться благоприятными возможностями и защититься от потенциальных угроз.

Описание сильных и слабых сторон разработки, а также возможностей и угроз во внешней среде представлено в табл.5.1.

Таблица 5.2. SWOT-анализ

<p>Сильные стороны проекта: С1. Большой функционал разработки С2. Простота эксплуатации С3. Высокая точность С4. Наличие экспериментального оборудования С5. Квалифицированный персонал</p>	<p>Слабые стороны проекта: Сл1. Отсутствие масштабной технологии производства Сл2. Слабая маркетинговая политика Сл3. Недостаток финансовых средств</p>
<p>Возможности: В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ В2. Высокая заинтересованность в высокоточном и простом оборудовании В3. Повышение стоимости конкурентных разработок</p>	<p>Угрозы: У1. Отсутствие спроса на новые технологии производства У2. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования со стороны государства У3. Развитие альтернативных технологий и аналогов</p>

В табл.5.3 представлена интерактивная матрица проекта, в которой выявлены соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды.

Таблица 5.3. Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	+	+	+	+	+
	B2	+	+	+	0	+
	B3	+	+	+	-	+
Сильные стороны проекта						
Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	У1	+	+	+	-	0
	У2	-	0	-	-	-
	У3	+	+	-	0	-
Слабые стороны проекта						
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	B1	0	+	0	0	-
	B2	+	+	+	+	-
	B3	0	-	+	0	-
Слабые стороны проекта						
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
	У1	+	+	+	-	0
	У2	-	0	0	+	+
	У3	0	0	+	+	+

В таблице 5.4 представлена итоговая матрица SWOT-анализа.

Таблица 5.4. Итоговая матрица SWOT-анализа

	S	W
	Более эффективное использование инновационной структуры ТПУ может повысить качество исследования. Простота и точность удовлетворяет высокой заинтересованности в высокоточном и простом оборудовании.	Высокая заинтересованность в высокоточном и простом оборудовании может стать основой маркетинговой политики. Инновационная структура ТПУ поможет в масштабировании производства.
	Большой функционал разработки, простота эксплуатации, высокая точность помогут в преодолении отсутствия спроса и повышения уровня альтернативных разработок.	Устранение слабой маркетинговой политики и масштабирование производства помогут повысить спрос и конкурентоспособность.

Таким образом, достоинства разработанного секционированного калориметра являются надежным основанием для дальнейшего масштабирования технологии производства и удовлетворения спроса на простые и точные устройства диагностики, опередив менее точные и удобные в использовании разработки конкурентов.

5.2. Планирование научно-исследовательских работ

5.2.1. Структура работ в рамках научного исследования

На данном этапе определены разработки секционированного калориметра с привязкой к исполнителям. Работа выполнялась студентом (бакалавром) под руководством научного сотрудника Лаборатории №1 имеющего степень кандидата технических наук (табл.5.5).

Таблица 5.5. Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель

задания			
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований и способа решения задач	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	3	Построение плана экспериментов	Руководитель
	4	Моделирование конструкции калориметра	Бакалавр
	5	Расчет основных параметров калориметра	Бакалавр
	6	Калибровка калориметра	Бакалавр
	7	Проведение экспериментов с калориметром в различных условиях	Руководитель, бакалавр
	8	Обработка результатов исследований	Бакалавр
Обобщение и оценка результатов	9	Подготовка ВКР	Бакалавр

5.2.2. Разработка графика проведения научного исследования

В табл.5.6 представлен план проведения исследования с указанием исполнителей и времени, которое требуется для осуществления каждого этапа.

Продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях T_{ki} рассчитывается по формуле $T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал}$, где коэффициент календарности:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{181}{143} = 1,27$$

Количество календарных дней равно 181, а рабочих – 143 поскольку работа проходила в течение I и II квартала 2017 года.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i} \text{ – продолжительность } i\text{-й работы в рабочих днях;}$$

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу.

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5} \text{ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной}$$

работы, чел.-дн.

Таблица 5.6. Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость			Исполнители	Длит-сть в рабочих днях, T_{pi}	Длит-сть в календарных днях, T_{ki}
	t_{min} , чел.-дн.	t_{max} , чел.-дн.	$t_{ож}$, чел.-дн.			
Составление и утверждение технического задания	0,3	0,8	0,5	Руководитель	0,5	1
Выбор направления исследований и способа решения задач	0,5	1	0,7	Руководитель	0,7	1
Построение плана экспериментов	0,3	0,8	0,5	Руководитель	0,5	1
Моделирование конструкции калориметра	12	16	13,6	Бакалавр	13,6	17
Расчет основных параметров калориметра	10	14	11,6	Бакалавр	11,6	15
Калибровка калориметра	3	5	3,8	Бакалавр	3,8	5
Проведение экспериментов с калориметром в различных условиях	6	7,5	6,6	Руководитель, бакалавр	3,3	4
Обработка результатов исследований	5	10	7	Бакалавр	7	9
Подготовка ВКР	30	50	38	Бакалавр	38	48

Рассчитав временные показатели проведения научного исследования, составим календарный план-график проведения НИОКР. Наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта (табл. 5.7).

Таблица 5.7. Календарный план-график проведения НИОКР

№ раб.	T _{кi} , кал. дни	Продолжительность выполнения работ											
		март			апрель			май			июнь		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1	■											
2	1	■											
3	1	■											
4	17		■	■									
5	15				■	■							
6	5						■						
7	4							■					
8	9								■				
9	48									■	■	■	

■ – Руководитель

■ – Бакалавр

Проделанная работа была равномерно распределена в течение времени, выделенного для выполнения ВКР. Из календарного плана-графика видно, что наибольшее время было выделено для проведения моделирования калориметра и выполнения пояснительной записки ВКР.

5.3. Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научно-технического исследования (НТИ) должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета настоящего исследования были оценены затраты по следующим статьям:

- расходные материалы;
- затраты на персонал, включающие основную заработную плату исполнителей, а также отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

5.3.1. Затраты на расходные материалы

В ходе разработки секционированного калориметра были использованы расходные материалы. Ниже в таблице 5.8 приведен расчет их стоимости.

Таблица 5.8. Расчет стоимости расходных материалов

Наименование	Ед. измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на мат., руб
ABS пластик	см ³	5,7	35	200
Лист Медь М1 600x100x1 мм	1 шт	0,45	1386	623,7
Оргстекло блочное	1 кг	0,3	715	214,5
Итого				1047,2

5.3.2. Затраты на персонал

Научно-техническое исследование было выполнено студентом (бакалавром) со стипендией 1750 рублей под руководством научного сотрудника имеющего степень кандидата технических наук месячным окладом 23 000 рублей.

Таким образом, среднедневная заработная плата руководителя:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}}}{m} = \frac{23\,000}{26} = 884,62 \text{ руб.}$$

Среднедневная заработная плата бакалавра:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}}}{m} = \frac{1750}{26} = 67,3 \text{ руб.}$$

где m – среднее число рабочих дней в 1 месяце при 6-дневной рабочей неделе.

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p \cdot k_p$$

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

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

Вычислим продолжительность выполняемых работ, исходя из данных табл.5.5:

для руководителя:

$$T_p = \sum T_{pi} = 0,5 + 0,7 + 0,5 + 3,3 = 5 \text{ раб. дн.}$$

для бакалавра:

$$T_p = \sum T_{pi} = 13,6 + 11,6 + 3,8 + 3,3 + 7 + 38 = 77,3 \text{ дн.}$$

Теперь вычислим величину основной заработной платы за период выполнения работ:

для руководителя:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p \cdot k_p = 884,62 \cdot 5 \cdot 1,3 = 5750,03 \text{ руб.}$$

для бакалавра:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p \cdot k_p = 67,3 \cdot 77,3 \cdot 1,3 = 6762,98 \text{ руб.}$$

Вычисленные выше описанному алгоритму данные занесем в таблицу 5.8.

Таблица 5.9. Расчет основной заработной платы

Исполнители	Z_M , руб.	k_p	$Z_{\text{дн}}$, руб	$T_{\text{раб}}$ раб.дн.	$Z_{\text{осн}}$, руб.
Руководитель	23 000,0	1,3	884,62	5	5750,03
Бакалавр	1 750,0	1,3	67,3	77,3	6762,98
Итого					12513,0

5.3.3. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

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 по следующей формуле:

$$Z_{\text{внеб}} = Z_{\text{осн}} \cdot k_{\text{внеб}}$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.), равный 27,1%.

Таблица 5.10. Страховые отчисления на каждого из работников

Исполнитель	$Z_{\text{осн}}$, руб.	$k_{\text{внеб}}$	Страховые отчисления, $Z_{\text{внеб}}$
Руководитель	5750,03	27,1%	1558,25 руб.
Итого			1558,25 руб.

5.3.4. Накладные расходы

В процессе научно-исследовательской работы было затрачено 550 кВт энергии в процессе работы импульсного ускорителя электронов.

Стоимость одного киловатта энергии – 5,8 руб., следовательно, всего было затрачено 3190,0 руб. на электричество.

Итого на накладные расходы было потрачено **3190,0 руб.**

5.4. Оценка научно-технического эффекта

Социально-научный эффект проявляется в росте открытий, изобретений, увеличении суммарного объема научно-технической информации, полученной в результате выполнения НИОКР, создании научного «задела», являющегося необходимой предпосылкой для проведения в будущем прикладных НИОКР и выполнения работ по модернизации конструкции выпускаемых изделий.

За последние годы появились предложения не только по качественной характеристике социального эффекта, но и по системе количественных показателей его оценки.

Элементом количественной оценки социально-научного эффекта следует считать определение научно-технического эффекта НИОКР по методике, сущность которой состоит в том, что на основе оценок признаков работы определяется коэффициент научно-технического эффекта НИОКР:

$$H_T = \sum_{i=1}^3 r_i \cdot k_i,$$

где r_i – весовой коэффициент i -того признака (определяется по табл. 5.11); k_i – количественная оценка i -того признака.

Таблица 5.11. Значения весовых коэффициентов, присваиваемых различным признакам работы

Признак научно-технического эффекта НИОКР (i)	Примерные значения весового коэффициента (r)
Уровень новизны	0,6
Теоретический уровень	0,4
Возможности реализации	0,2

Количественная оценка уровня новизны НИОКР определяется на основе значения баллов по табл. 5.12

Таблица 5.12. Оценочная таблица уровня новизны разработки

Уровень новизны разработки	Характеристика уровня новизны	Баллы
Принципиально новая	Результаты исследований открывают новое направление в данной области науки и техники	8-10
Новая	По-новому или впервые объяснены известные факты, закономерности	5-7
Относительно новая	Результаты исследований систематизируют и обобщают имеющиеся сведения, определяют пути дальнейших исследований	2-4
Традиционная	Работа, выполненная по традиционной методике, результаты исследований носят информационный характер	1
Не обладающая новизной	Получен результат, который был ранее известен	0

Теоретический уровень полученных результатов НИОКР определяется на основе баллов, приведённых в табл. 5.13.

Таблица 5.13. Оценочная таблица теоретического уровня полученных результатов

Теоретический уровень полученных результатов	Баллы
Установление закона; разработка новой теории	10
Глубокая разработка проблемы: многоаспектный анализ связей, взаимозависимости между фактами с наличием объяснения	8
Разработка способа (алгоритм, программа мероприятий, устройство и т.п.)	6
Элементарный анализ связей между фактами с наличием гипотезы, симплексного прогноза, классификации, объясняющей версии или практических рекомендаций частного характера	2
Описание отдельных элементарных фактов (вещей, свойств и отношений); изложение опыта, наблюдений, результатов измерений	0,5

Возможность реализации научных результатов определяется на основе значения баллов табл. 5.13.

Таблица 5.14. Оценочная таблица времени и масштабов реализации проекта

Время реализации	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	4
Более 10 лет	2
Масштабы реализации	Баллы
Одно или несколько предприятий	2
Отрасль (министерство)	4
Народное хозяйство	10
Примечание: Баллы по времени и масштабам реализации складываются.	

В работе разработан секционированный калориметр, что не было ранее освещено в литературе.

Как правило, для оценки распределения энергии в пучке, и энергии вынесенной за анод используются интегральные и фольговые калориметры, основанные на том же принципе вычисления данных характеристик, что и секционированный калориметр. Таким образом, уровень новизны разработки определим как новый, $k_1=5$.

Поскольку в работе показана зависимость нагрева отдельных участков калориметра от поглощенной энергии пучка, то теоретическому уровню полученных результатов в соответствии с табл.5.13 присваивается $k_1=2$.

Время реализации разработки по оценкам составляет в течении первых лет в масштабах одного или нескольких предприятий. В соответствии с таблицей 5.14:

$$k_3 = 10 + 2 = 12$$

Таким образом, коэффициент научно-технического эффекта равен:

$$H_T = 0,6 \cdot 7 + 0,4 \cdot 2 + 0,2 \cdot 12 = 7,4$$

Таблица 5.15. Оценка уровня научно-технического эффекта

Уровень научно-технического эффекта	Коэффициент научно-технического эффекта
Низкий	1-4
Средний	5-7
Сравнительно высокий	8-10
Высокий	11-14

В соответствии с таблицей 5.15, уровень научно-технического эффекта разработки оценивается как средний.

5.5. Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

В результате финансового анализа были оценены все расходы на проведение исследования (табл.5.16). Общая сумма расходов составляет **18308,45 рублей.**

Таблица 5.16. Суммарные затраты на исследование

Вид расходов	Стоимость, руб
Расходные материалы	1047,2
Затраты на персонал	12513,0
Страховые отчисления	1558,25
Накладные расходы	3190,0
Итого	18308,45 руб.

Таким образом, в настоящей главе проведена оценка коммерческого потенциала и перспективности научного исследования. Разработка была также рассмотрена с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения в сравнении с существующими на рынке конкурентами. С помощью SWOT-анализа были определены сильные и слабые стороны проекта, а также изучены рыночные возможности и угрозы. Результатом анализа стала разработка стратегия использования внутренних ресурсов для эффективного

пребывания поведения во внешней среде. Помимо этого, в данном разделе разработан поэтапный план проведения научно-исследовательских работ с привязкой к исполнителю. На основе этого плана был разработан график работы, спланирован бюджет проекта. В разделе проведена оценка научно-технического эффекта по методике, основанной на анализе признаков работы. В соответствии с этой методикой уровень научно-технического эффекта разработки считается средним.

Список публикаций

1. I. Egorov, G. Remnev, A. Poloskov, & M. Serebrennikov. Effect of emission current delay on the efficiency of electron beam production. *Vacuum*, 2017, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.03.030>