

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

---

Институт Неразрушающего контроля  
Направление подготовки 12.03.01 Приборостроение  
Кафедра Точного приборостроения

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
<b>Малогабаритный бетатрон</b>

УДК 621.384.634.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б3В	Затонов Иван		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий лабораторией №43	Штейн М.М.	к.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Грахова Е.А.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Инженер	Маланова Н.В.	к.т.н.		

По разделу «Вопросы технологии»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ТПС	Гормаков А.Н.	к.т.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Точного приборостроения	Бориков В.Н.	д.т.н.		

Томск – 2017 г.

## ЗАПЛАНИРОВАННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ПРОГРАММЕ

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВО, критериев и/или заинтересованных сторон
<b><i>Профессиональные компетенции</i></b>		
Р1	Применять современные базовые и специальные естественнонаучные, математические и инженерные знания для разработки, производства, отладки, настройки и аттестации средств приборостроения с использованием существующих и новых технологий, и учитывать в своей деятельности экономические, экологические аспекты и вопросы энергосбережения	Требования ФГОС (ОПК-1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10; ОК-3,9; ПК-2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11.12, 13, 14, 15, 16,17, 18), Критерий 5 АИОР (п.1.1, 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р2	Участвовать в технологической подготовке производства, подбирать и внедрять необходимые средства приборостроения в производство, предварительно оценив экономическую эффективность техпроцессов; принимать организационно-управленческие решения на основе экономического анализа	Требования ФГОС (ОК-3, ОПК-7; ПК-8,9,10, 11, 12, 13-18) Критерий 5 АИОР (п.1.4, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р3	Эксплуатировать и обслуживать современные средств измерения и контроля на производстве, обеспечивать поверку приборов и прочее метрологическое сопровождение всех процессов производства и эксплуатации средств измерения и контроля; осуществлять технический контроль производства, включая внедрение систем менеджмента качества	Требования ФГОС (ОК-9, ОПК-3; ППК-14, 15, 16). Критерий 5 АИОР (п.1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EURACE</i> и <i>FEANI</i>
Р4	Использовать творческий подход для разработки новых оригинальных идей проектирования и производства при решении конкретных задач приборостроительного производства, с использованием передовых технологий; критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы; использовать основы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности	Требования ФГОС (ОК-3,ОК-6, ОПК-2, 3,4, 5, 6, 7,8,9, ПК-1,2,9,14). Критерий 5 АИОР (п.1.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р5	Планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования по своему профилю с использованием новейших достижения науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области знаний, соответствующей выполняемой работе	Требования ФГОС (ОК-5, ОК-6 ОПК-2, 3,4,5,6; ПК-1,2,3,4). Критерий 5 АИОР (п.1.2, 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
Р6	Использовать базовые знания в области проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения комплексной инженерной деятельности; уметь делать экономическую оценку разрабатываемым приборам, консультировать по вопросам проектирования конкурентоспособной продукции	Требования ФГОС (ОК-3, ПК-6,8,14,17), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВО, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Универсальные компетенции</i>		
P7	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ОК-7), Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, а также руководить командой, демонстрировать ответственность за результаты работы	Требования ФГОС (ОК-6, ПК-17), Критерий 5 АИОР (п.2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-5, ОПК-2), Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P10	Ориентироваться в вопросах безопасности и здравоохранения, юридических и исторических аспектах, а так же различных влияниях инженерных решений на социальную и окружающую среду	Требования ФГОС (ОК-2, 4, 8, 9,10; ОПК-9) Критерий 5 АИОР (п.2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P11	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-4), Критерий 5 АИОР (п.1.6, 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

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

---

Институт Неразрушающего контроля  
Направление подготовки 12.03.01 Приборостроение  
Кафедра Точного приборостроения

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_ Бориков В.Н.  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

**Бакалаврской работы**

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

Студенту:

Группа	ФИО
1Б3В	Затонову Ивану

Тема работы:

Малогабаритный бетатрон

Утверждена приказом директора (дата, номер)	пр. №703/с от 03.02.2017
---	--------------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b> <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Объект исследования – магнитное и тепловое поле малогабаритного импульсного бетатрона МИБ-10;</li><li>2. Режим работы – однополярный импульсный. Длительность импульса 4,2 мс. Частота повторения импульсов – 150 Гц</li><li>3. Материал электромагнита – листовая электротехническая сталь 3408 толщиной 0,3 мм.</li><li>4. Коэффициент заполнения материалом – 0,95.</li><li>5. Температура окружающей среды – 20°С.</li></ol>
--	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Анализ литературы по вопросу расчета основных параметров магнитного поля.</li> <li>2. Расчет задачи магнитного поля в программе конечно-элементного анализа.</li> <li>3. Определение основных характеристик магнитного поля бетатрона.</li> <li>4. Расчет тепловых потерь в электромагните на основе результатов расчета магнитной задачи.</li> <li>5. Изготовление трехмерной модели излучателя бетатрона.</li> <li>6. Моделирование тепловой картины поля излучателя бетатрона.</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b>  <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Приложение А: рабочий чертеж стяжки, трехмерная модель излучателя бетатрона.</p>

<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>  <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Грахова Елена Александровна</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Маланова Наталья Викторовна</p>
<p>Вопросы технологии</p>	<p>Гормаков Анатолий Николаевич</p>

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий лабораторией №43	Штейн Михаил Михайлович	К.Т.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1Б3В	Затонов Иван		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1БЗВ	Затонову Ивану

<b>Институт</b>	Неразрушающего контроля	<b>Кафедра</b>	Точного приборостроения
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	12.03.01 Приборостроение

<b>Исходные данные к разделу «Вопросы технологии»:</b>	
1. Годовая программа выпуска или размер партии	Мелкосерийное производство
2. Конструкторская документация на изделия	Чертежи общего вида излучателя бетатрона, спецификация, рабочие чертежи деталей
3. ГОСТы, стандарты, нормали, справочники	ГОСТ 2.004-88 ЕСКД ГОСТ 14.301—73 ЕСТПП
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
1. Определение сборочного состава изделия. 2. Разработка технологического процесса сборки. 3. Разработка операционной карты технологического процесса изготовления стяжки. 4. Анализ технологичности детали	ГОСТ 2.004-88 ЕСКД ГОСТ 14.301—73 ЕСТПП. Справочник по материалам ГОСТы на сортамент Справочник по допускам и посадкам Справочники по станочному оборудованию, оснастки и инструменту
<b>Перечень графического материала:</b>	
Карта технологичного процесса сборки, Карта технологичного процесса изготовления детали, Рабочий чертеж детали, Спецификация	

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент кафедры ТПС	Гормаков А.Н.	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1БЗВ	Затонов Иван		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1Б3В	Затонову Ивану

<b>Институт</b>	Неразрушающего контроля	<b>Кафедра</b>	Точного приборостроения
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	12.03.01 Приборостроение

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	- Исследование проводится для John Macleod Electronics, Ltd (Великобритания). - В исследовании задействованы 2 человека: инженер-дипломник и научный руководитель. Приблизительная стоимость затрат на выполнение научно-исследовательской работы составляет 650 тыс. рублей.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	- НИР выполняется в соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность».
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	- Отчисления по страховым взносам – 30% от ФОТ.

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

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	- Техничко-экономическое обоснование НИР; - Потенциальные потребители результатов исследования; - Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения; - SWOT-анализ.
2. Планирование процесса управления НИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	- Структура работ в рамках научного исследования; - Определение трудоемкости выполнения работ; - Разработка графика проведения научного исследования; - Бюджет научно-технического исследования (НИ).
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	- Оценка научно-технического уровня НИР.

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

1. Матрица SWOT	
2. График проведения и бюджет НИР (график Ганта);	

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

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Ассистент кафедры менеджмента	Грахова Елена Александровна			

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1Б3В	Затонов Иван -		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1Б3В	Затонову Ивану

<b>Институт</b>	Неразрушающего контроля	<b>Кафедра</b>	Точного приборостроения
<b>Уровень образования</b>	бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	12.03.01 Приборостроение

<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<i>1. Характеристика объекта исследования и области его применения</i>	Объектом исследования является моделирование магнитного и теплового поля малогабаритного бетатрона с использованием программ конечно-элементного анализа
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p><i>1. Производственная безопасность</i></p> <p><i>1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при эксплуатации объекта исследования.</i></p> <p><i>1.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.</i></p> <p><i>1.3 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.</i></p>	<p>Проводим анализ выявленных вредных и опасных факторов:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Повышенный уровень электромагнитных излучений</li> <li>2. Отклонение показателей микроклимата на рабочем месте.</li> <li>3. Повышенный уровень шума.</li> <li>4. Недостаточная освещенность.</li> <li>5. Монотонность труда</li> <li>6. Поражение электрическим током</li> </ol>
<p><i>2. Экологическая безопасность:</i></p> <p><i>2.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду</i></p> <p><i>2.2 Анализ «жизненного цикла» объекта исследования.</i></p> <p><i>2.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.</i></p>	Для рассмотрения характера воздействия разрабатываемой методики на окружающую среду, проведем анализ ее «жизненного цикла», который состоит из стадий компьютерного моделирования и дальнейшего применения на практике.
<p><i>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</i></p> <p><i>3.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований.</i></p> <p><i>3.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований.</i></p> <p><i>3.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС.</i></p>	<p>Рассмотрим вероятные чрезвычайные ситуации, которые могут возникнуть в процессе разработки и производства стабилизатора.</p> <p>Наиболее вероятным чрезвычайным происшествием на предприятии является пожар. Пожар – это неконтролируемое горение вне специально отведенного очага, приносящее материальный ущерб.</p>
<p><i>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</i></p> <p><i>4.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства.</i></p>	В Российской Федерации вопросы, относящиеся к организации и охране труда при работе за компьютером, регулируются: - трудовым кодексом РФ;

4.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя.	- типовой инструкцией по охране труда при работе на персональном компьютере; - требованиями к организации и оборудованию рабочих мест с ПЭВМ для взрослых пользователей.
--	---

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Инженер	Маланова Н.В.	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БЗВ	Затонов И. -		

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

Институт Неразрушающего контроля  
 Направление подготовки (специальность) 12.03.01 Приборостроение  
 Уровень образования: бакалавриат  
 Кафедра точного приборостроения  
 Период выполнения \_\_\_\_\_ (осенний / весенний семестр 2016/2017 учебного года)

Форма представления работы:

<b>Бакалаврская работа</b>
----------------------------

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
 выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
10.12.2016	Обзор литературы	5
25.03.2017	Проведение моделирования магнитного и теплового поля бетатрона	40
15.04.2017	Вопросы технологии	25
29.04.2017	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
12.05.2017	Социальная ответственность	15

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий лабораторией №43	Штейн Михаил Михайлович	К.Т.Н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Точного приборостроения	Бориков Валерий Николаевич	Д.Т.Н.		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 120 с., 28 рис., 26 табл., 33 источника, 7 прил.

Ключевые слова: малогабаритный бетатрон, магнитное поле, тепловая картина поля, моделирование.

Объектом исследования является: способ расчета основных характеристик магнитного и теплового поля, а также проведения численного моделирования.

Цель работы – Применение программ конечно-элементного анализа для моделирования магнитного и теплового поля малогабаритного бетатрона. Расчет основных характеристик магнитного поля. Построение картины теплового поля бетатрона.

В процессе исследования проводился: обзор литературы, а также анализ возможности применения альтернативного метода расчета характеристик магнитного и теплового поля.

В результате исследования: экспериментально получена кривая зависимости индукции от напряженности и кривая зависимости потерь от индукции; рассчитаны основные характеристики магнитного поля бетатрона; приведена методика расчета тепловых потерь; построена тепловая картина поля.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: Бетатрон работает в однополярном импульсном режиме с длительностью импульса 4,2 мс и частотой 150 Гц; температура окружающей среды 20 °С; электромагнит выполнен из листовой электротехнической стали 3408 толщиной 0,3 мм; режим работы – «30 минут нагрузка-30 минут пауза».

Степень внедрения: Не внедрено. На стадии разработки.

Область применения: Дефектоскопия, инспекционно-досмотровые комплексы; медицина.

Экономическая эффективность/значимость работы: возможность сокращения времени расчета основных качественных характеристик магнитного и теплового полей бетатрона, что позволяет существенно сократить финансовые затраты.

В будущем планируется: применять программы конечно-элементного анализа для расчета характеристик магнитного и теплового полей.

## **Нормативные ссылки**

В данной выпускной квалификационной работе использовались ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ 12.2.032-78. ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
2. ГОСТ 12.1.038-82. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
3. ГОСТ 12.1.033-81. ССБТ. Пожарная безопасность.
4. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.

## **Определения**

В данной разделе приведены определения к терминам, используемым в работе.

**Бетатрон:** Индукционный ускоритель электронов.

**Диакоптика:** Один из возможных методов расчленения сложных тел или систем при их исследовании с целью представления в виде блок-схемы или графа.

**Метод конечных элементов:** Численный метод решения интегральных и дифференциальных уравнений с частными производными, возникающих при решении задач строительной механики, математической физики и других областей деятельности.

**Кривая намагничивания:** График, определяющий зависимость индукции от напряженности магнитного поля.

**Мгновенное значение тока и напряжения:** Мгновенным называют значение тока или напряжения, определяемого для произвольного момента времени  $t$ .

## **Обозначения и сокращения**

ВКР – выпускная квалификационная работа;

ЭДС – электродвижущая сила;

МИБ-10 – малогабаритный импульсный бетатрон с энергией электронов 10 МэВ;

CAD – (Computer-aided design) Системы автоматического проектирования;

ПК – персональный компьютер;

ЭМП и ЭСП – электромагнитное и электростатическое поле;

ЭЛТ – электронно-лучевая трубка;

ВДТ – видеодисплейный терминал;

ВДУ – временный допустимый уровень;

ПЭВМ – персональная электро-вычислительная машина;

ИИИ – источник ионизирующего излучения.

## Оглавление

Введение.....	19
1    Магнитное поле малогабаритного импульсного бетатрона.....	21
1.1    Обзор литературы.....	21
1.2    Объект и методы исследования .....	22
1.3    Принцип работы .....	22
1.4    Основные задачи ускорения.....	23
1.5    Методы измерения характеристик магнитного поля.....	25
1.6    Метод конечных элементов.....	27
1.7    Моделирование магнитного поля .....	28
1.7.1    Настройка бетатрона .....	28
1.7.2    Выбор основных параметров электромагнита бетатрона .....	29
1.7.3    Расчетные уравнения основных параметров магнитного поля бетатрона .....	30
1.7.4    Численное моделирование.....	31
1.7.5    Экспериментальное получение зависимости индукции от напряженности.....	33
1.7.6    Начало расчетов магнитного поля в программе Elcut .....	37
1.8    Результаты.....	38
1.9    Выводы по расчетам магнитного поля.....	42
2    Тепловая картина поля бетатрона.....	44
2.1    Обоснование важности контроля тепловой картины поля .....	44
2.2    Экспериментальное получение кривой зависимости потерь от индукции .....	46
2.3    Расчет потерь в стали по данным модели.....	48

2.4	Трехмерная модель излучателя бетатрона.....	49
2.5	Задание свойств тепловой задачи в среде Comsol .....	51
2.6	Результаты моделирования тепловой задачи .....	53
	Заключение .....	55
3	Вопросы технологии .....	57
3.1	Служебное назначение, техническое описание изделия и его технические характеристики.....	58
3.2	Определение сборочного состава изделия.....	59
3.3	Организационная форма и метод сборки .....	60
3.4	Разработка технологического процесса сборки .....	62
3.5	Разработка операционной карты технологического процесса изготовления стяжки поз. 18 .....	63
3.6	Анализ технологичности детали.....	65
3.7	Анализ сборки излучателя бетатрона на технологичность.....	66
	Заключение .....	67
4	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	68
4.1.1	Технико-экономическое обоснование научно-исследовательской работы .....	68
4.1.2	Потенциальные потребители результатов исследования.....	69
4.1.3	Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	70
4.1.4	SWOT-анализ .....	72
4.2	Планирование научно-исследовательских работ.....	73
4.2.1	Структура работ в рамках научного исследования.....	73
4.2.2	Определение трудоемкости выполнения работ .....	74

4.2.3	Разработка графика проведения научного исследования .....	78
4.3	Бюджет научно-технического исследования (НТИ).....	84
4.3.1	Расчет затрат на сырье и материалы НТИ .....	84
4.3.2	Расчет затрат на специальное оборудование.....	85
4.3.3	Основная заработная плата исполнителей темы.....	86
4.3.4	Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала .....	89
4.3.5	Отчисления на социальные нужды.....	89
4.3.6	Накладные расходы.....	90
4.3.7	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта....	90
4.4	Оценка научно-технического уровня НИР .....	91
	Заключение .....	94
5	Социальная ответственность.....	95
5.1	Производственная безопасность.....	95
5.1.1	Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при эксплуатации объекта исследования.....	95
5.1.2	Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований.....	96
5.1.3	Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов.....	105
5.2	Экологическая безопасность .....	106
5.2.1	Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду.....	106
5.2.2	Анализ «жизненного цикла» объекта исследования .....	106
5.2.3	Обоснование мероприятий по защите окружающей среды.....	107
5.3	Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	108

5.3.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований. ....	108
5.3.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований .....	108
5.3.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС .....	111
5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	112
5.4.1 Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства. ....	112
5.4.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. ....	114
Заключение .....	116
Список литературы: .....	117
Список публикаций студента.....	120
Приложения А – Сборочный состав излучателя бетатрона	
Приложение Б – Схема сборки излучателя бетатрона	
Приложение В – Излучатель бетатрона (схема принципиальная)	
Приложение Г – Излучатель бетатрона (схема принципиальная). Спецификация	
Приложение Е – Операционная карта технологического процесса изготовления стяжки	
Приложение Ж – Операционная карта технологического процесса сборки излучателя бетатрона	
Приложение З – Рабочий чертеж детали	

## **Введение**

Бетатроны среди многочисленных ускорителей заряженных частиц нашли широкое применение как в научных, так и в практических целях. В бетатроне заряженные частицы (электроны) ускоряются по круговой орбите электрическим полем, которое индуцируется изменяющимся магнитным потоком. Таким образом, электрическое поле воздействует на ускоряемый электрон непрерывно на протяжении всего времени разгона в ускорительной камере. По этой причине бетатроны выделяют в отдельный класс ускорителей – индукционных.

Другими отличительными качествами бетатронов, относительно других видов ускорителей, являются хорошие массо-габаритные показатели, удобство эксплуатации, высокая рентабельность производства. Несмотря на широкое применение бетатронов в дефектоскопии деталей и изделий, радиационной медицине, инспекционно-досмотровых комплексах и других областях, их применение ограничивается невысокой интенсивностью ионизирующего излучения, наличием перегрева и другими негативными факторами. Решение данных проблем является приоритетным направлением в бетатростроении.

Широкое развитие информационных технологий позволяет применять новые методы для расчета и исследования основных характеристик малогабаритного бетатрона. Целью данной выпускной квалификационной работы является применение программных продуктов, используемых в персональных компьютерах, для численного моделирования магнитного и теплового полей малогабаритного импульсного бетатрона для их дальнейшего анализа.

Объектом исследования ВКР является магнитное и тепловое поле малогабаритного импульсного бетатрона, выпускаемого Томским политехническим университетом. В ходе исследования ставилась задача разработки методики применения программных пакетов конечно-элементного

анализа для расчета основных характеристик магнитного и теплового поля малогабаритных импульсных бетатронов.

Разработка методики расчета данных характеристик с применением программ конечно-элементного анализа является перспективным направлением работы, результаты которого планируется применять в дальнейшем для усовершенствования конструкции бетатрона.

Исследование велось на базе лаборатории № 43 «Разработки малогабаритных бетатронов» Института неразрушающего контроля Томского политехнического университета.

В ходе исследований были получены такие характеристики магнитного поля, как: радиус равновесной орбиты и индукция на этом радиусе, энергия магнитного поля, показатель спадания, потенциальная функция и другие важные характеристики, полный перечень которых представлен в работе. Результаты данного исследования были представлены на конференциях всероссийского и международного уровня. Опубликованы статьи в базах данных РИНЦ и Scopus.

# **1 Магнитное поле малогабаритного импульсного бетатрона**

## **1.1 Обзор литературы**

Анализ литературных источников показал, что тематика применения программ конечно-элементного анализа для исследования магнитных и тепловых характеристик малогабаритного импульсного бетатрона рассмотрена в литературе слабо.

Однако, как в отечественной, так и в зарубежной литературе, много работ посвящено исследованию характеристик магнитного поля реальной конструкции бетатрона.

Одни из наиболее ранних работ по описанию принципа действия магнитного поля бетатрона принадлежат Вильяму Керсту, которого во всем мире считают создателем первого действующего циклического ускорителя. В своих статьях[1,2] В. Керст приводит основные соотношения для магнитного поля бетатрона, такие как радиус равновесной орбиты, показатель спадания магнитного поля и др. Кроме того, в работах раскрывается зависимость распределения магнитного поля в зазоре электромагнита от формы полюсов и шунтов.

В стенах Томского политехнического университета в 1948 году был запущен первый отечественный бетатрон на энергию 4 МэВ. Особый вклад в развитие бетатростроения в России внесли такие томские ученые как А.А. Воробьев, Л.М. Ананьев, В.А. Москалев, В.Л. Чахлов, В.Н. Титов, Б. Н. Родимов и другие.

Бетатроны принято делить на три категории: со средней энергией, сильноточные и малогабаритные бетатроны. Производство малогабаритных бетатронов для промышленной дефектоскопии в стенах Томского политехнического университета было начато в 1962 году. С тех пор ТПУ является опорным вузом не только в России, но и во всем мире по разработке бетатронов.

## **1.2 Объект и методы исследования**

Объектом исследования являются основные характеристики магнитного и теплового полей бетатрона. Необходимо произвести сравнение теоретически-рассчитанных характеристик с экспериментально-полученными данными.

В ходе выполнения научно-исследовательской работы по теме выпускной квалификационной работе были поставлены следующие задачи:

- Произвести моделирование магнитного поля бетатрона и определить его основные параметры;
- Разработать методику расчета основных параметров магнитного поля по имеющейся модели;
- Рассчитать тепловые потери в электромагните бетатрона и его обмотках;
- Получить картину теплового поля;
- Произвести анализ картины теплового поля;
- Сделать заключение о возможности использования данной модели для применения полученных на ней результатов в производстве.

Основным методом исследования является применение программ конечно-элементного анализа для проведения расчетов и моделирования полей.

## **1.3 Принцип работы**

При разгоне электрона в электрическом поле индукционного вида, на всем протяжении его движения будет действовать сила, направление которой совпадает с направлением движения электрона. Возвратившись в исходную точку, электрон приобретет большую кинетическую энергию, чем на предыдущем обороте. Увеличение энергии после одного оборота может возрастать на совсем небольшие величины, однако, если повторить процесс оборота по замкнутой круговой траектории многократно, то можно добиться

большой энергии электрона. Ускорение электронов с помощью электромагнитной индукции по замкнутому контуру позволило добиться энергий в несколько миллионов электрон-вольт.

Однако, идея ускорения электронов по круговым орбитам вдоль силовых линий индуцированного электрического поля не имела бы никакой ценности без указания способа, при помощи которого можно удержать электрон на силовой линии электрического поля, на орбите неизменного радиуса, замкнутой вокруг магнитного потока.

Данную проблему решил Р.Видероз в ходе проведения теоретического анализа вопроса ускорения электронов при помощи электромагнитной индукции. Р.Видероз установил следующее: магнитное поле в бетатроне в течение времени ускорения нарастает. При этом, на электрон воздействует два противоположных фактора: вихретоковое электрическое поле действует в сторону непрерывного увеличения радиуса орбиты электронов, а нарастающее магнитное поле наоборот – стремится уменьшить его.

Р.Видероз заключил, что можно подобрать такое соотношение этих двух стремлений, что электрон будет двигаться в нарастающем магнитном поле по окружности определенного неизменного радиуса. Так, в 1927 году появилось понятие «равновесная орбита». Более подробно мы познакомимся с этим понятием в следующих главах.

Следует отметить, что условие существования равновесной орбиты в индукционных ускорителях не зависит от массы заряженных частиц. Таким образом, одним из отличительных качеств бетатронов является то, что их работа не нарушается при разгоне электронов до скоростей, близких к скоростям света, что приводит к увеличению массы частиц.

#### **1.4 Основные задачи ускорения**

Как уже говорилось выше, бетатрон является ускорителем импульсного действия. Электроны будут ускоряться полем до тех пор, пока магнитный поток

нарастает. После этого происходит спадание магнитного потока, следовательно, электрическое поле меняет знак и будет иметь место не ускорение, а замедление частиц.

Основными этапами при ускорении электронов является инжекция частиц в ускорительную камеру, процесс ускорения и смещение электронов на мишень или вывод их из камеры. Каждый этап привязан к определенной величине магнитного поля.

На рисунке 1 показана форма импульсов магнитного поля малогабаритных бетатронов. Первым этапом, определяющим эффективность работы ускорителя, является инжекция электронов. Процесс захвата электронов и фокусировка пучка на равновесной орбите происходит в момент времени  $t_1 - t_2$ , когда магнитное поле мало и соответствует напряжению инжекции.

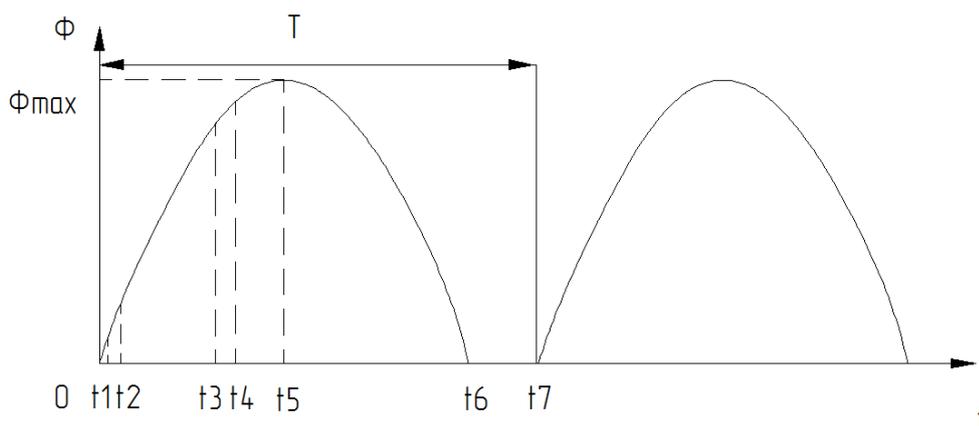


Рисунок 1 – Рабочий цикл бетатрона, где  $0 - t_5$  – нарастание магнитного потока;  $t_5 - t_6$  – спадание магнитного потока;  $t_6 - t_7$  – пауза между импульсами;  $T$  – период импульсов;  $\Phi_{max}$  – амплитудное значение магнитного потока

Следующим этапом является непосредственно ускорение сфокусированного пучка электронов. Под действием силы вихревого электрического поля  $eE_r$  электроны, сфокусированные вблизи равновесной орбиты, начинают увеличивать свою энергию. Наиболее важной задачей при

этом является сохранение заряда, сформированного в результате захвата, до конца цикла ускорения.

Процесс увеличения энергии электронов продолжается до тех пор, пока происходит нарастание магнитного потока  $\Phi$ , т.е. в промежутке времени  $t_2 - t_5$ .

После прохождения максимума  $\Phi_{max}$  магнитный поток начнет спадать, а, следовательно, направление вектора индуцированного электрического поля изменится на противоположное, что приведет к торможению электронов в течение времени  $t_5 - t_6$ . В этом интервале времени энергия электронов будет уменьшаться.

На участке времени  $t_3 - t_4$  путем смещения электронов с радиуса равновесной орбиты на мишень искусственно прекращают их ускорение.

Ввод электронов в ускорительную камеру и смещение пучка занимают незначительную часть рабочего цикла бетатрона. Наиболее времязатратным является сам процесс ускорения электронов. При ускорении электронов неизбежно наличие перерывов, которые позволяют получать быстрые электроны только отдельными порциями.

## 1.5 Методы измерения характеристик магнитного поля

Одной из основных характеристик магнитного поля является индукция. Зная величину индукции в конкретной точке, при помощи дальнейших расчетов получают главные качественные показатели магнитного поля излучателя бетатрона, такие как радиус равновесной орбиты, показатель падения, потенциальная функция и др.

В настоящее время имеется множество методов измерения магнитной индукции. Рассмотрим некоторые из них.

Пусть потокосцепление изменяется с течением времени от величины  $\Psi_1$  до  $\Psi_2$ . Заряд  $q$ , который протекает по проводу, будет находиться по формуле 1:

$$q = \frac{1}{R}(\Psi_1 - \Psi_2) \quad (1)$$

, где  $R$  – сопротивление провода.

Данное соотношение лежит в основе метода измерения магнитной индукции, разработанного А.Г. Столетовым и носящего название – «баллистического способа измерения магнитной индукции» (рисунок 2).

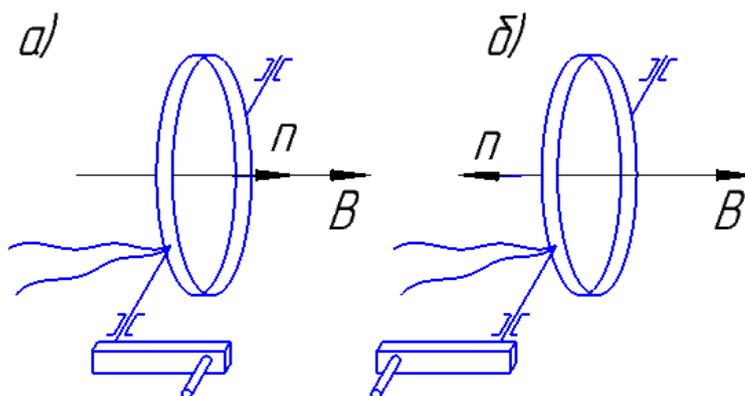


Рисунок 2 – Принцип баллистического способа измерения индукции

В исследуемое поле помещается обмотка, имеющая  $N$  витков, таким образом, чтобы вектор магнитной индукции  $B$  был перпендикулярен плоскости витков. Тогда полное потокосцепление будет рассчитываться по формуле:

$$\Psi_1 = N * B * S \quad (2)$$

, где  $S$  – площадь одного витка.

Если повернуть катушку на  $180^\circ$ , то величина потокосцепления изменится на противоположное и станет равным:

$$\Psi_2 = N * B * S \quad (3)$$

Полная величина потокосцепления примет величину:

$$\Psi_1 - \Psi_2 = 2 * N * B * S \quad (4)$$

Если поворот катушек произвести как можно быстрее, то в катушке возникнет импульс тока, заряд которого определяется выражением:

$$q = \frac{2}{R} * N * B * S \quad (5)$$

Однако данный метод применим только для измерения постоянных полей. Кроме того, процесс резкого разворота катушек на  $180^\circ$  сложен в реализации и, как правило, требует наличия привода.

Другим способом измерения магнитной индукции является использование Тесламетров (ТМ). Данные приборы по принципу воздействия с магнитным полем подразделяются на ТМ с преобразователем Холла, ферромодуляционный ТМ и ТМ с квантовыми магнитоизмерительными преобразователями.

Тесламетры обладают рядом недостатков. К примеру, показания ТМ с преобразователем Холла зависят от температуры окружающей среды, что вносит дополнительную погрешность.

Наиболее распространенным методом определения плотности магнитного потока является применение в процессе измерения закона электромагнитной индукции. Принцип выражения плотности магнитного потока из закона электромагнитной индукции приведен в разделе «Экспериментальное получение зависимости индукции от напряженности».

Относительно новым методом определения параметров магнитной индукции и других важных характеристик магнитного поля является применение программ конечно-элементного анализа. В ходе нашей работы основной упор был сделан на данный метод.

## **1.6 Метод конечных элементов**

Большинство инженерных решений требуют наличия корректно работающей расчетной модели и ее построение настолько тесно связано с процессом вычислений, что порой разделить эти процессы не представляется возможным.

Среди обширного списка методов, входящих в состав диакоптики, широкое распространение получил метод конечных элементов. Область, занимаемая исследуемой моделью, разделяется на конечные элементы. Как

правило, в плоской задаче конечными элементами являются треугольники, а в пространственной – тетраэдры. Внутри каждого элемента задаются функции формы, позволяющие определить перемещение в узлах конечных элементов. Более подробно метод конечных элементов рассмотрен в работе [3].

Программы конечно-элементного анализа в связи с универсальными средствами анализа конструкций, сред и процессов, получили большое распространение в последнее время. Среди наиболее популярных программ можно выделить Ansys, Nastran, Comsol и др. Также популярностью в России пользуется отечественный продукт – Elcut, имеющий низкую цену относительно других перечисленных программных пакетов.

## **1.7 Моделирование магнитного поля**

### **1.7.1 Настройка бетатрона**

При производстве бетатронов обычно возникают трудности, связанные с их настройкой, которая заключается в подборе параметров магнитного поля для получения номинальной энергии электронов и максимальной мощности дозы.

Настройка бетатронов производится несколькими способами:

- Настройка бетатрона путем перебора составных частей, влияющих на распределение магнитного поля бетатрона и измерения получаемой для каждого варианта мощности дозы излучения. Для уверенности в том, что бетатрон хорошо настроен и дает близкую к максимально-возможной мощность дозы, в таком случае требуется десятки, а иногда и сотни переборок.
- Проведение магнитных измерений и на их основе более целенаправленное изменение параметров магнитного поля в межполюсном зазоре. Тогда удастся получить хороший результат за несколько переборок.

Как уже говорилось выше, принцип действия бетатрона основан на том, что в спадающем по радиусу и нарастающем во времени магнитном поле возможно движение электрона по круговой орбите постоянного радиуса с набором энергии. Прирост энергии за один оборот пропорционален скорости изменения магнитного потока внутри орбиты. Любое отклонение электрона от постоянной орбиты приводит к появлению магнитных сил, возвращающих его назад на эту орбиту, поэтому ее радиус  $r_0$  называется равновесным.

Одна из основных задач настройки – найти оптимальный радиус равновесной орбиты электронов, так как этот радиус определяет и энергию ускоренных электронов, и область действия магнитных фокусирующих сил, следовательно, их количество.

### 1.7.2 Выбор основных параметров электромагнита бетатрона

В релятивистской механике соотношение между основными параметрами магнитного поля бетатрона – радиуса равновесной орбиты  $r_0$  и плотности магнитного потока  $B_z(r_0)$ , определяется известным уравнением[4]:

$$W = \sqrt{[300r_0B_z(r_0)]^2 + E_0^2} - E_0 \quad (6)$$

, где  $W$  – кинетическая энергия ускоренных электронов;  $r_0$  – радиус равновесной орбиты;  $B_z(r_0)$  – магнитная индукция на равновесной орбите;  $E_0$  – энергия покоя электронов, которая равна 0,511 МэВ.

Из бесконечного числа пар, образуемых радиусом равновесной орбиты и индукции на этом радиусе, принимаются во внимание только те соотношения, которые отвечают следующим условиям:

1. Распределение магнитной индукции в зазоре, образуемом полюсами, в процессе ускорения электронов должно обеспечить соблюдение «бетатронного условия» или «соотношения два к одному».
2. Электромагнит должен иметь минимально возможную массу.

3. Нагревание электротехнической стали электромагнита и его обмоток не должно превышать допустимые нормы.

В ходе расчетов, для выявления наиболее удачного выбора соотношений магнитного пол бетатрона, рекомендуется производить несколько вариантов расчетов. Сравнение результатов расчетов покажут их пригодность и возможность реализации при конструировании электромагнита.

### **1.7.3 Расчетные уравнения основных параметров магнитного поля бетатрона**

Равновесный радиус находится из простого условия, которое в теории бетатрона получило название «соотношение два к одному» [5]:

$$2B_z(r_0) = B_{cp}, \quad (7)$$

, где  $B_z(r)$  – индукция магнитного поля на равновесном радиусе  $r$ ,  $B_{cp}$  – средняя индукция в круге  $r_0$ .

По результатам магнитных измерений строят также зависимость показателя спадания магнитного поля от радиуса [6]:

$$n = - \frac{dB_z(r_0)r}{B_z(r_0)dr} \quad (8)$$

В бетатростроении показатель спадания используется для оценки фокусирующих свойств магнитного поля. По форме и величине показателя спадания можно судить о пригодности магнитного поля бетатрона для ускорения и фокусировки пучка электронов. В свою очередь, данная характеристика не дает полного представления о фокусирующих свойствах магнитного поля.

Наиболее полную информацию о фокусирующих свойствах магнитного поля дает его потенциальная функция. По форме и величине потенциальной функции можно судить о том, какая величина заряда сфокусирована и ускорена

полем. Следовательно, потенциальная функция определяет также интенсивность излучения бетатрона [7]:

$$V_{\mu} = \frac{eA^2}{2mc^2} = \frac{e}{2mc^2} \left[ \frac{rB_{cp}}{2} \right]^2 \quad (9)$$

, где  $e$  – заряд электрона;  $A$  – векторный магнитный потенциал;  $m$  – масса электрона;  $c$  – скорость света.

#### 1.7.4 Численное моделирование

В данной работе ставилась задача показать, что вместо трудоемких магнитных измерений характеристик магнитного поля для реальных конструкций бетатронов с необходимой точностью можно получить численным моделированием. Численное моделирование может существенно сократить время настройки бетатрона.

Такое моделирование возможно осуществить при помощи программных пакетов конечно-элементного анализа, о которых уже говорилось выше

Для численного моделирования основных характеристик магнитного поля бетатрона был использован программный пакет Elcut, как наиболее простой и доступный. Анализ производился на примере конструкции малогабаритного бетатрона.

Геометрия электромагнита бетатрона представлена на рисунке 3.

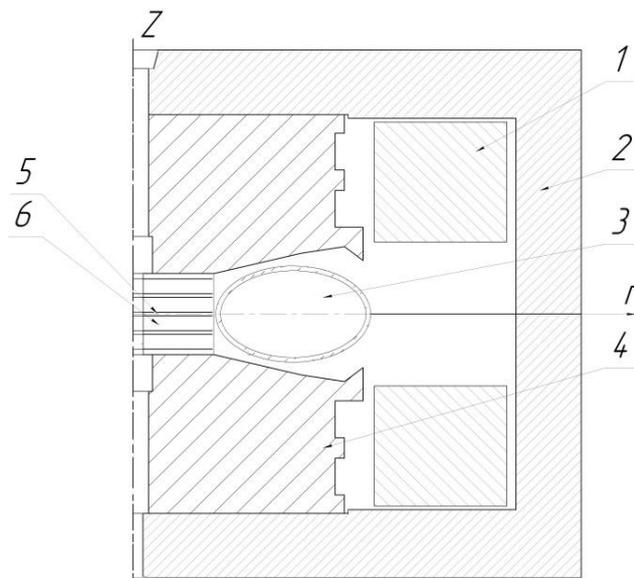


Рисунок 3 – Геометрическая модель бетатрона, симметричного относительно оси  $r$ , где 1 – Катушка с током 9000 ампер-витков; 2 – Обратный магнитопровод; 3 – Камера рентгеновская бетатронная; 4 – Магнитные полюса; 5 – Пять одинаковых магнитных прокладок толщиной по 2,4 мм; 6 – Четыре магнитные галетки толщиной по 8 мм

С учетом осесимметричной конструкции бетатрона МИБ-10 в программном пакете Elcut была начерчена геометрическая модель с последующим заданием физических параметров объектов. Работа с геометрической моделью производится в цилиндрической системе координат в полуплоскости  $zr$  ( $r \geq 0$ ) (рисунок 4, а).

Поскольку в программном пакете решение производится по методу конечных элементов, процесс наложения сетки является обязательным этапом моделирования. Чем меньше шаг сетки, тем в общем случае выше точность расчета, но больше его время. Первоначально была проведена серия расчетов с принудительно выбранными шагами 2, 1, 0,5 и 0,25 мм.

Для проверки точности расчетов был проведен эксперимент по определению зависимости точности расчетов от величины степени дискретизации сетки в программе Elcut, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость числа узлов сетки от дискретизации сетки

d, мм	Количество узлов сетки
0.25	1697190
0.5	423710
0.75	186028
1	104624
2	25921
3	11636
4	6483
5	4320

Для каждого варианта дискретизации сетки был произведен отдельный расчет задачи с дальнейшим определением основных параметров магнитного поля модели. Результаты расчета показали, что начиная с шага 1мм, результаты практически не меняются и не зависят от числа узлов сетки. Установленная после этого опция автоматического выбора шага сетки с числом узлов, равным 13403, дала такой же результат. Картина сетки при автоматическом выборе приведена на рисунке 4,б. В дальнейшем расчет велся в автоматическом режиме дискретизации.

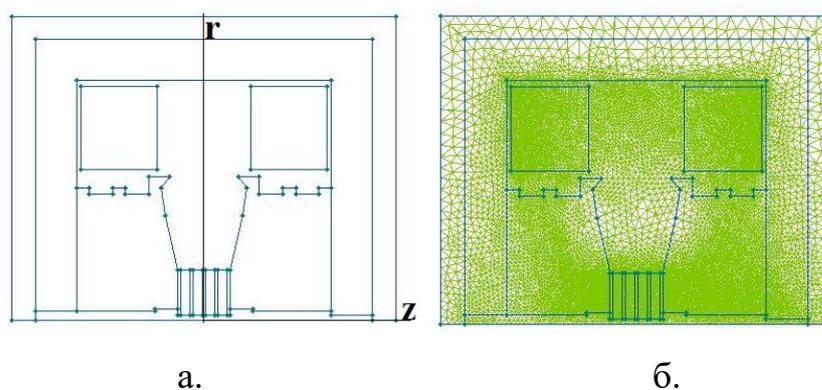


Рисунок 4 – Геометрическая модель бетатрона в осесимметричном классе модели; б. автоматическая дискретизация сетки, нанесенная на исследуемую

## **2 Тепловая картина поля бетатрона**

### **2.1 Обоснование важности контроля тепловой картины поля**

Бетатрон, как источник ионизирующего излучения в радиационном методе контроля находит все большее применение. По этой причине, обеспечение безотказной работы бетатрона является стратегической целью разработчиков. Одной из актуальных проблем в теории бетатроностроения, является наличие тепловых потерь в активных частях бетатрона. Под такими активными элементами понимаются элементы, выполненные из ферромагнитных материалов, которые находятся в магнитном поле и элементы, служащие проводниками электрического тока. Поскольку процесс распространения тепла – самопроизвольный, он оказывает влияние на формирование теплового состояния не только активных элементов, но и окружающих их остальных частей устройства. При этом часть выработанного активными элементами тепла теряется в окружающую среду. Потери тепла приводят к снижению полезной мощности устройства, что требует компенсации расходуемой энергии и увеличения затрат [10].

Таким образом, остро встает вопрос о возможности численного моделирования тепловых полей электрических устройств.

Одним из важнейших требований, которое ставится перед производителями бетатронов, является обеспечение длительной работы ускорительных установок без опасного превышения температуры в любой из точек конструкции электромагнита.

Конструкция электромагнита напрямую влияет на фокусирующие свойства магнитного поля излучателя бетатрона. Производители стремятся добиться высоких показателей ресурсоэффективности, в том числе – уменьшения массо-габаритных характеристик. По этой причине вопросам конструирования электромагнитов бетатронов посвящено множество научных

работ. В свою очередь, тепловому расчету излучателя бетатрона уделено мало влияния.

Целью данного раздела является определение слабых мест в конструкции электромагнита бетатрона с точки зрения перегрева, а также изучение процесса охлаждения электромагнита.

Согласно [11], как правило, тепловые расчеты для электромагнитов проводятся при помощи способов и методов, заимствованных из трансформаторостроения по причине значительных накопленных знаний их расчета.

Процессы нагревания и охлаждения электромагнита бетатрона отличается от аналогичных процессов для трансформатора следующими аспектами:

1. Зазор, образуемый формой полюсов, меняет ход тепловых потоков в электромагните. Следует отметить, что именно эта часть электромагнита вместе с боковыми стенками шунтов образуют контур, выделяющий наибольшее количество тепла на единицу объема.

2. Полюса и шунты набираются из электротехнической стали, расположенных радиально, что непосредственно влияет на ход распространения тепловых потерь и распространения температур. Этим обеспечивается точная круговая симметрия, необходимая для ускорения электронов.

3. Бетатроны работают в однополярном импульсном режиме.

Форма и величина импульсов тока в обмотках исследуемой модели бетатрона, представлены на рисунке 16. Импульсы представляют собой синусоидальную полуволну с амплитудой 500 А и полупериодом – 4,2 мс. Частота повтора импульсов – 150 Гц. Форма импульсов приведена на рисунке 1.

Как в случае с кривой намагничивания, из-за однополярного импульсного режима работы бетатрона, применение предлагаемых в литературе

зависимостей тепловых потерь от индукции в электромагните для электротехнической стали 3408 не представляется возможным.

По этой причине была проведена работа по экспериментальному получению кривой зависимости потерь от индукции.

## 2.2 Расчет потерь в стали по данным модели

Потери в стали определялись по формуле Маренина-Штейнмеца [12]:

$$P = a * k_z * \rho * \sum_{i=1}^{i=n} V_i * B_i^b \quad (19)$$

, где  $k_z$  – коэффициент заполнения сталью;  $\rho$  – плотность электротехнической стали 3408;  $V_i$  – рассматриваемый объем;  $B_i$  – средняя индукция в рассматриваемом объеме.

Поскольку магнитная индукция по электромагниту излучателя бетатрона распространяется неравномерно, для повышения точности расчета было принято решение разбить стальные элементы модели на блоки, объем которых стремится к нулю. Чем меньше объем рассматриваемого блока, тем однородней распределение магнитной индукции. На рисунке ниже представлен пример разделения полюсов:

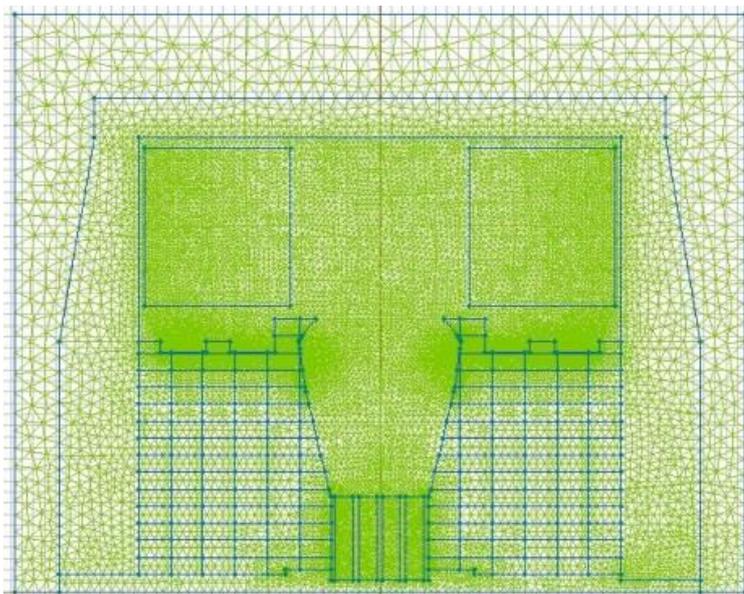


Рисунок 19 –разделение полюсов на блоки

После разделения электромагнита бетатрона, в каждом из блоков производились измерения объема и средней индукции по объему. Расчет потерь производился по формуле 19.

В процессе работы обмотки подвергаются сильному перегреву и вносят существенный вклад в распределение температуры внутри блока излучателя. Расчет полных потерь в меди производился по формуле:

$$P_M = \frac{\rho * l_{\text{ср.в.}} * w * I_d}{S} \quad (20)$$

, где  $\rho$  – удельное сопротивление медного провода излучателя бетатрона;  $l_{\text{ср.в.}}$  – средняя длина витка;  $w$  – число витков обмотки;  $I_d$  – действующая величина тока, подаваемого на обмотки;  $S$  – площадь сечения медного провода.

Рассчитанные значения тепловых потерь в стали и меди по формулам (19) и (20) представлены в таблице ниже:

Таблица 2 – Величина удельных потерь в электротехнической стали излучателя и обмотках.

Источник	Потери, Вт
Обратный магнитопровод	461.85
Полюса	96.6
Шунты	13.48
Обмотки	475.166

Таким образом, наибольшими потерями обладают обратный магнитопровод и обмотки. Судить о том, какой из элементов будет обладать наивысшей температурой, руководствуясь данными о потерях в стали и меди рано. Необходимо брать в учет объем деталей и условия охлаждения.

Другие пассивные и активные элементы находящиеся внутри корпуса электромагнита также являются источниками теплового излучения, но потери в них значительно меньше, поэтому они не учитывались.

### 2.3 Трехмерная модель излучателя бетатрона

Магнитопровод излучателя рассматриваемой модели бетатрона имеет шестистоечную конструкцию, по этой причине расчет теплового поля необходимо проводить на основании трехмерной модели. Следующим этапом было создание трехмерной модели излучателя бетатрона для проведения теплового расчета.

Создание трехмерной модели бетатрона производилось в среде автоматизированного проектирования “Т-flex CAD” (Рисунок 20). Данный выбор CAD-системы обусловлен простотой интерфейса, доступности к лицензионной версии продукта и другими положительными качествами.

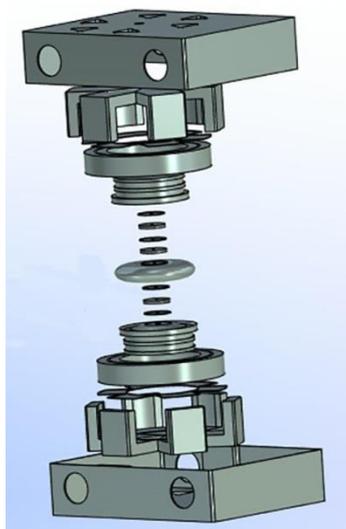


Рисунок 20 – Электромагнит бетатрона в разобранном виде

Кроме самой конструкции излучателя бетатрона для дальнейшего расчета тепловой картины поля в трехмерной постановке была начерчена модель, имитирующая распространение воздуха внутри бетатрона (Рисунок 21).

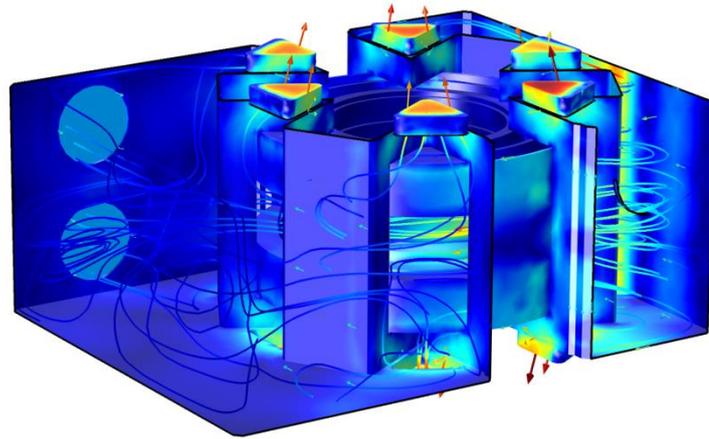


Рисунок 21 – Система охлаждения малогабаритного бетатрона

Рисунок 21 приведен в качестве примера того, каким именно образом распространяются воздушные потоки внутри конструкции малогабаритного бетатрона. В данной работе вопрос распространения воздушных потоков не рассматривается, из-за высокой трудоемкости процесса.

Поскольку имеющаяся версия программного пакета Elcut не позволяла производить расчет нестационарной тепловой задачи в трехмерной постановке, было принято решение перейти к другим видам программ конечно-элементного анализа.

Выбор пал на программу конечно-элементного анализа Comsol. Данный программный продукт отвечает всем поставленным требованиям.

#### **2.4 Задание свойств тепловой задачи в среде Comsol**

Дерево модели состоит из шести основных блоков: геометрии, материалов, физики, сетки, задачи и результатов.

В первую очередь был произведен импорт модели в программную среду Comsol. Масштаб модели к реальному изделию составляет один к одному.

Для упрощения модели использовались материалы, встроенные в библиотеку программы, по этой причине дюралюминий, из которого выполнен корпус прибора заменен на алюминий, а молибденовое стекло марки с-49 на керамическое стекло с плотностью, соответствующей молибденовому стеклу.

Данные элементы не являются источниками теплового излучения, по этой причине замена материалов не оказывает значимого воздействия на результат решения.

При решении тепловой задачи, программа потребовала задания основных свойств веществ, необходимых для расчета задачи данного типа. К таким свойствам относится удельная теплоемкость, теплопроводность, плотность материалов и показатель адиабаты для воздуха. Свойства веществ, используемых при моделировании, приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Свойства веществ, используемых при моделировании

	Удельная теплоемкость $C$ , Дж/(кг*К)	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м*К)	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Показатель адиабаты $\gamma$ , (при $T=20^\circ\text{C}$ )
Алюминий	900	238	2700	-
Воздух	1005	0.022	1.2041	1.4
Электротехническая сталь 3408	500	58	7620	-
Стекло	730	1.4	2210	-
Стеклотекстолитовые прокладки	960	0.37	1900	-
Медь	385	400	8960	-

Блок задания физики является одним из самых важных этапов при моделировании. В данном блоке задается фаза вещества (твердое, жидкое или газообразное); источники тепла; термическая изоляция и др. Как уже говорилось в главах выше, электромагнит бетатрона в поле действия магнитного поля и обмотки излучателя начнут выделять тепло. В блоке физики были заданы удельные потери, взятые из таблицы 2, источников тепла в излучателе бетатрона.

Следующим этапом подготовки задачи к решению является задание сетки. Поскольку наша модель обладает большим объёмом, было принято решение создания грубой сетки для модели. Общее число элементов составило 172058 с числом узлов – 30335.

Наиболее распространенные режимы работы бетатрона: «45 минут работы – 15 минут охлаждение», «30 минут работы – 30 минут охлаждение». В

данной работе был рассмотрен первый этап 30-минутной нагрузки бетатрона. По этой причине в блоке решения задачи был выбран нестационарный тип решения задачи «time dependent».

После задания всех свойств для решения тепловой задачи было запущено моделирование.

### 3 Вопросы технологии

При изготовлении любого прибора или изделия подготовка производства состоит из конструкторского, технологического и организационно-производственного этапа подготовки. Наиболее трудоёмким процессом является этап технологической подготовки. Главной задачей технологической подготовки производства является обеспечение полной готовности компании, фирмы или завода к производству новых изделий с установленными технико-экономическими параметрами, такими как: качество изделия, массо-габаритные показатели; себестоимость изделия и др.

Процесс технологической подготовки производства состоит из следующих основных этапов:

- Отработка детали или изделия на технологичность;
- Разработка техпроцессов и маршрутов;
- Технологическое оснащение процесса производства;
- Техническое сопровождение опытного образца, установочной партии и установившегося серийного производства и др.

Кроме перечисленных этапов, технологический процесс подготовки производства может включать разработку способов автоматизации производства, внедрение поточных методов в производство, организация и оснащение рабочих, выбор средств и методов хранения сырья и др.

В данной части выпускной квалификационной работы рассмотрен процесс изготовления стяжки для электромагнита излучателя бетатрона, производимого Томским политехническим университетом; проведен анализ изделия на технологичность; разработан технологический процесс сборки бетатрона; выбрана организационная форма сборки. В процессе выполнения данной части выпускной квалификационной работы в качестве учебных материалов использовались [13-15].

### **3.1 Служебное назначение, техническое описание изделия и его технические характеристики**

Работа бетатрона, как и другого любого ускорителя, состоит из нескольких основных этапов. Первый этап заключается в процессе ввода в ускорительную камеру пучка заряженных частиц – электронов, которые были ускорены по определенной энергии. Данный процесс называется инжекцией электронов.

Второй этап – наиболее время затратный процесс, при котором электроны ускоряются до заданных расчетных значений.

Третий этап – смещения пучка электронов, достигших заданного значения энергии с радиуса равновесной орбиты на мишень.

Наиболее важной задачей в процессе изготовления бетатронов, является настройка магнитного поля, напрямую влияющего на качественные характеристики бетатрона.

Диапазон рабочих частот бетатронов лежит в интервале от 150 до 400 Гц. Увеличение частоты работы бетатронов приводит к повышению мощности тормозного излучения, в свою очередь это также приводит к росту температуры перегрева в основных частях бетатронной установки, что может привести к поломке. Одной из актуальных задач, стоящих перед разработчиками является уменьшение температуры перегрева конструкции при увеличении рабочей частоты. Для уменьшения температуры перегрева необходимо изменить конструкцию излучателя бетатрона. При этом необходимо помнить, что характеристики магнитного поля системы должны остаться неизменными.

Рабочая частота бетатрона, рассматриваемого в данной ВКР, составляет 150 Гц. На обмотки бетатрона подается однополярное импульсное напряжение с амплитудой 500 В. Время действия импульса  $4,2 * 10^{-3}$  с. Данное напряжение будет создавать переменное по времени магнитное поле, которое наведет в электромагните бетатрона магнитный поток. По закону электромагнитной индукции переменный магнитный поток наведет электрическое поле, которое

будет воздействовать на пучок электронов, заставляя их вращаться вдоль силовых линий.

При увеличении скорости вращения электронов в нарастающем магнитном потоке будут проявляться факторы, действующие в две противоположные стороны: магнитное поле – в сторону уменьшения радиуса орбиты вращения электронов, а электрическое поле в сторону его увеличения. Таким образом, на определенном радиусе от оси вращения данные две тенденции уравновесят друг друга. Данный эффект в теории бетатроностроения носит название «два к одному». Если индукция магнитного поля в радиусе  $r$  будет меньше в два раза средней индукции магнитного круга на орбите, то рост импульса электрона будет происходить в течение всего времени движения электрона пропорционально росту магнитного поля в точках орбиты.

### **3.2 Определение сборочного состава изделия**

В целях сохранения коммерческой тайны в данном разделе выпускной квалификационной работы рассматривается только принципиальная схема излучателя бетатрона, установленного в корпусе прибора.

Принципиальная схема бетатрона с основными элементами представлена на рисунке 25.

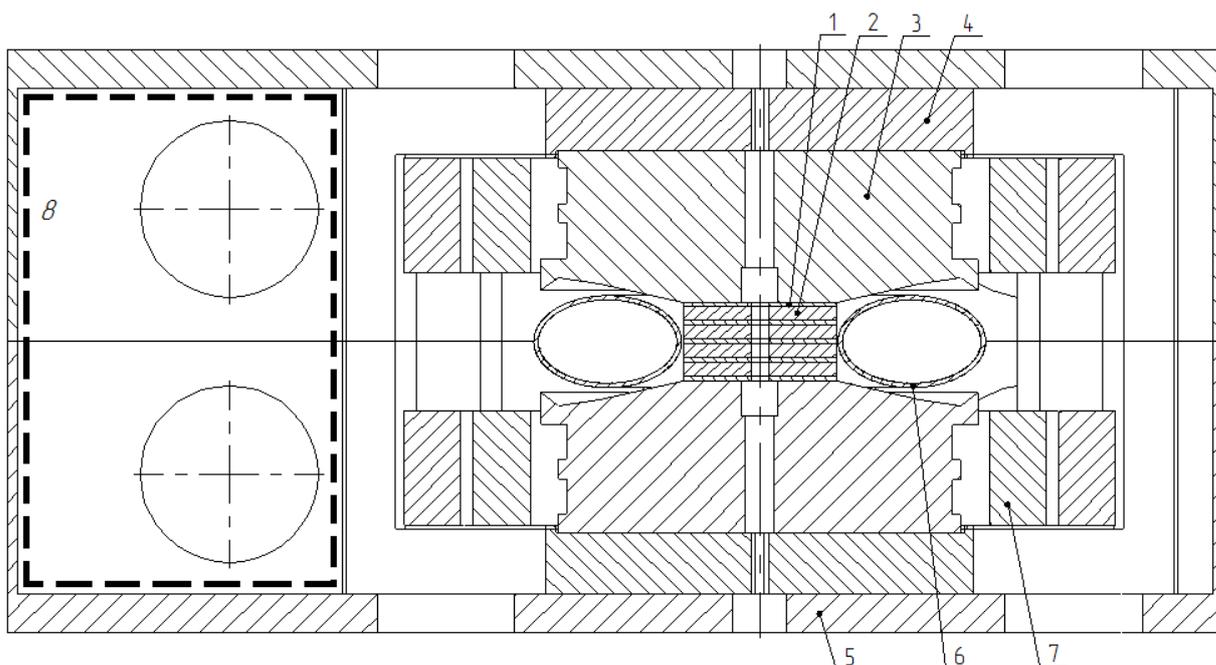


Рисунок 25 – Принципиальная схема бетатрона, где 1 – набор стеклотекстолитовых прокладок; 2 – шунты (листовая электротехническая сталь 0.3 мм); 3 – полюс (листовая электротехническая сталь 0.3 мм); 4 – магнитопровод (листовая электротехническая сталь 0.3 мм); 5 – корпус бетатрона (Алюминиевый литейный сплав АЛ4); 6 – ускорительная трубка (молибденовое стекло); 7 – обмотки(медный провод квадратным сечением 116 мм<sup>2</sup>); 8 – область для установки блока электроники

Сборочный состав изделия приведен в приложении А.

### 3.3 Организационная форма и метод сборки

Тип организационной формы сборки зависит от серийности производства. В Томском политехническом университете выпускается в среднем 50 бетатронов в год. Наиболее подходящей организационной формой сборки является стационарно-дифференцированная (рисунок 4.2)[13].

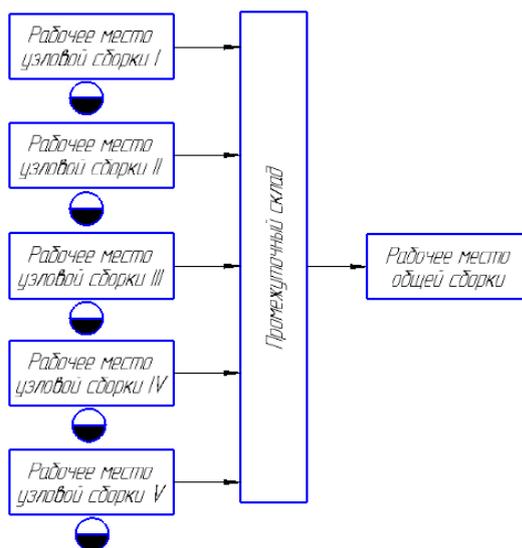


Рисунок 26 – схема стационарно-дифференцированной формы сборки

На рабочем месте №1(РМ 1) собирают полюса электромагнита; РМ 2 – магнитопровод; РМ 3 – набор центральных вкладышей, с учетом немагнитного зазора; РМ 4 – изготовление обмоток; РМ 5 – блок электроники.

В зависимости от того, какие сроки поставлены для сборки бетатрона, количество рабочих мест узловой сборки может варьироваться от трех и более мест.

При изготовлении бетатрона на начальном этапе производится: 1) сборка электромагнита из листовой электротехнической стали; корректировка профиля электромагнита; 2) намотка катушек; 3) монтаж проводников и др. Некоторые элементы конструкции закупают в специализированных компаниях. К таким элементам относится ускорительная трубка.

Процесс сборки бетатрона является трудоемким процессом, требующим большого количества времени. К примеру, на настройку одного бетатрона может уходить от одной недели, до месяца. По этой причине и с целью сохранения коммерческой тайны, технология сборки в данной части ВКР рассматриваться не будет.

Однако приведем общий принцип сборки излучателя малогабаритного бетатрона. Части электромагнита (магнитопровод, полюса, шунты,

немагнитные зазоры из стеклотекстолита) и обмотку будем считать готовыми изделиями, поступающими на общую сборку.

### 3.4 Разработка технологического процесса сборки

Схема сборки излучателя малогабаритного бетатрона в корпусе в упрощенном виде приведена в приложении Б.

В качестве базовой детали для проведения процесса сборки было выбрано основание бетатрона с габаритными размерами 684 × 534 × 165 мм.

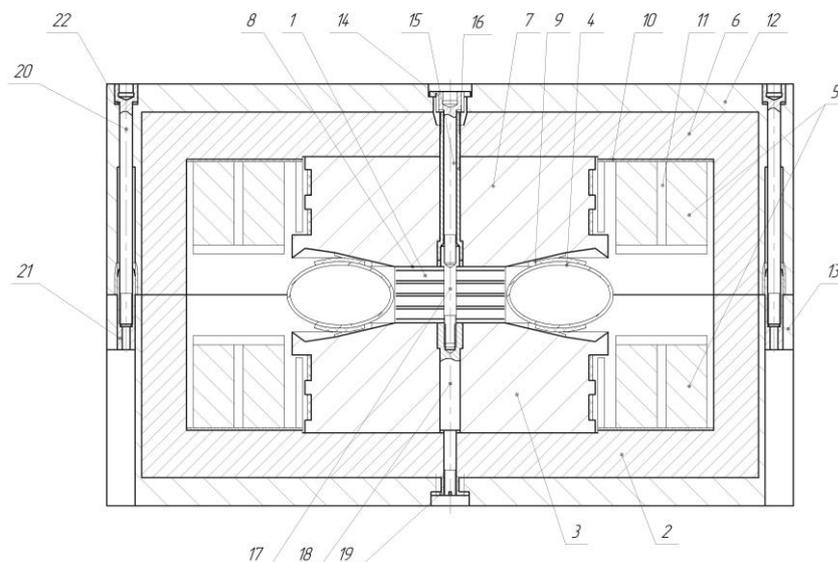


Рисунок 27 – Принципиальная схема сборочного состава для операционной карты сборки бетатрона

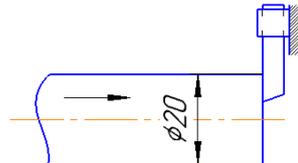
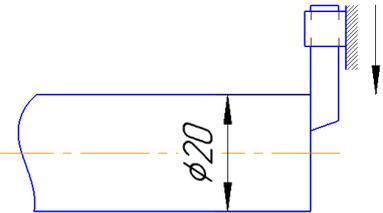
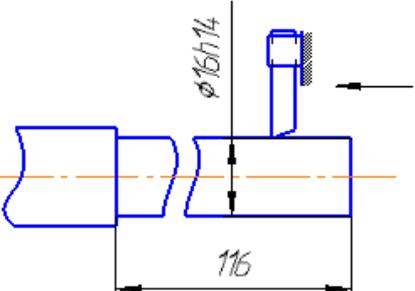
На рисунке 27 приведены следующие обозначения: 1 – шунты; 2 – магнитопровод нижний; 3 – полюс нижний; 4 – ускорительная камера; 5 – обмотки; 6 – магнитопровод верхний; 7 – полюс верхний; 8 – набор стеклотекстолитовых прокладок; 9 – резиновая прокладка; 10 – стеклотекстолитовая прокладка для магнитопровода; 11 – прокладка для обеспечения технологического зазора; 12 – крышка корпуса; 13 – основание корпуса; 14 – втулка верхняя; 15 – стяжка верхняя; 16 – болт стяжной; 17 – стяжка для центральных вкладышей; 18 – стяжка для полюса нижнего; 19 – втулка; 20 – стяжной болт; 21 – стяжка; 22 – шайба.

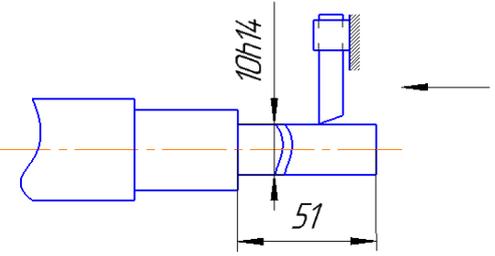
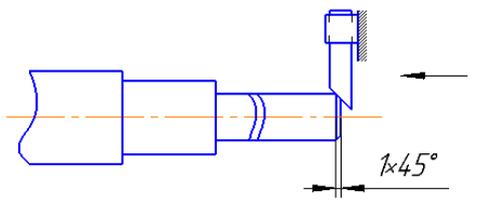
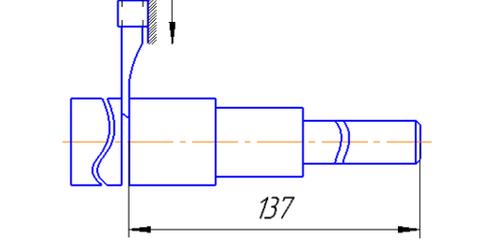
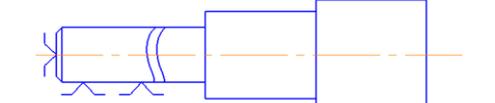
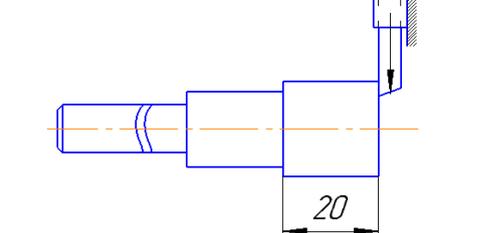
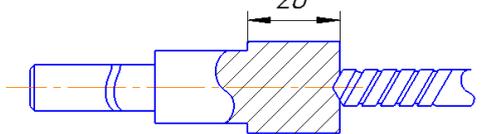
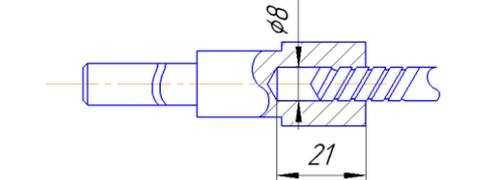
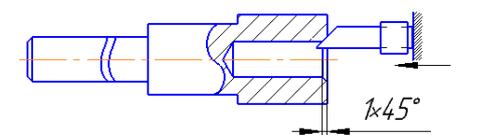
Принципиальная схема излучателя бетатрона и спецификация приведены в приложении В и Г, соответственно. Операционная карта технологического процесса сборки приведена в приложении Д.

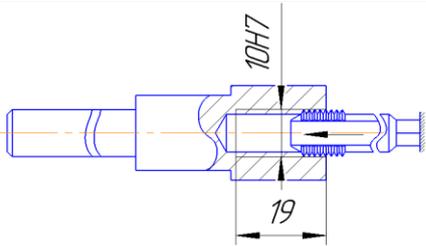
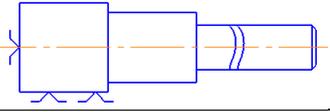
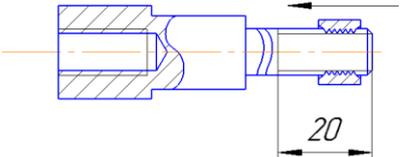
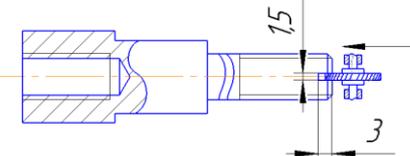
### 3.5 Разработка операционной карты технологического процесса изготовления стяжки поз. 18

В таблице ниже приведены основные технологические операции, описывающие последовательность изготовления центральной стяжки для малогабаритного импульсного бетатрона. Разработка операционной карты производилась в соответствии с [14]. Операционная карта технологического процесса изготовления стяжки представлена в приложении Е.

Таблица 4 – Эскизно-операционная карта технологического процесса изготовления стяжки поз. 18

№ операции	№ перехода	Наименование операции и переходов	Эскиз
1	1	<u>Подготовительная</u> Промыть и протереть пруток	
2	1	<u>Токарно-револьверная</u> Подать заготовку до упора	
	2	Подрезать торец	
	3	Обточить поверхность до $\phi 16h14$ на длине 116 мм проходным резцом	

4	Обточить поверхность до $\varnothing 10h14$ проходным резцом на длине 51 мм с подрезкой торца	
5	Проточить фаску $1 \times 45^\circ$ проходным отогнутым резцом	
6	Отрезать деталь отрезным резцом	
7	Снять и установить деталь	
8	Подрезать торец отрезным резцом	
9	Центровать отверстие	
10	Сверлить отверстие $\varnothing 8H12$ сверлом $\varnothing 8$ ГОСТ 10902-77	
11	Проточить фаску $1 \times 45^\circ$ проходным отогнутым резцом	

	12	Нарезать резьбу М10 Н7 метчиком на малых оборотах	
	13	Снять и установить деталь	
	14	Нарезать резьбу М10 g8 плашкой на малых оборотах	
	15	Фрезеровать паз шириной 1.5 мм на глубину 3 мм	
3	1	<u>Моечная</u> Промыть и просушить деталь	
4	1	<u>Химическая</u> Провести химическое пассивирование	
5	1	<u>Контрольная</u> Провести полный контроль	

Рабочий чертеж детали представлен в приложении Ж.

### 3.6 Анализ технологичности детали

Анализ изделия на технологичность проводится с целью определения возможности получения заготовок рассматриваемой детали прогрессивными методами, а также обеспечить надежную работу, повысить долговечности изделия, выявить его удобство в эксплуатации, обеспечить ремонтпригодность, транспортабельность и другое.

Был проведен анализ технологичности стяжки поз. 18. В результате анализа было установлено:

- изготовление исходной заготовки происходит с минимальным отходом материала;

- конструкторские базы могут быть использованы как измерительные и технологические, что позволит повысить точность изготовления за счет уменьшения погрешностей базирования;
- поверхности детали однотипные, что позволяет уменьшить число операций, переходов, оснастки, оборудования для их обработки;
- простановка размеров обеспечивает точность функциональных параметров деталей и методов их достижения;
- возможно применение высокопроизводительных процессов, позволяющих снизить трудоемкость и стоимость обработки;

Анализ показал, что конструкция стяжки поз. 18 является технологичной для условий мелкосерийного производства.

### **3.7 Анализ сборки излучателя бетатрона на технологичность**

Перед разработкой технологических процессов необходимо проводить анализ технологичности конструкции изделия.

Излучатель бетатрона является сборочной единицей, имеющей три ступени сборки. На второй ступени сборки бетатрон разделяется на две сборочные единицы и шесть деталей; первая ступень сборки состоит из шести сборочных единиц. Большое количество сборочных единиц изделия позволяет ускорить процесс сборки. Кроме этого сборочные единицы можно собирать, регулировать и производить их проверку независимо друг от друга.

Большое количество сборочных единиц позволяет производить взаимозаменяемость деталей, без проведения трудоемких регулировочных операций.

В сборочном составе бетатрона отсутствуют неразъемные соединения сборочных единиц. Это, в первую очередь, вызвано тем, что в процессе настройки магнитного поля бетатрона приходится снимать верхний блок излучателя бетатрона для корректировки профиля электромагнита или замены пакетов центральных вкладышей.

Таким образом, можно сказать, что излучатель бетатрона является технологичным.

## **Заключение**

В данной части выпускной квалификационной работы была выбрана организационная форма и метод сборки для малогабаритного импульсного бетатрона, производимого в Томском политехническом университете. Было выявлено, что наиболее подходящей организационной формой сборки является стационарно-дифференцированная сборка.

Был разработан технологический процесс сборки излучателя малогабаритного бетатрона в корпусе прибора.

Разработана операционная карта технологического процесса изготовления стяжки для излучателя бетатрона. Проведен анализ технологичности детали. Можно сказать, что стяжка для полюса является высокотехнологичной деталью.

## **4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Бетатроны в качестве источников ионизирующего излучения нашли широкое применение в таких отраслях промышленности, как медицина, дефектоскопия, досмотр грузов и др. Однако, из-за низкой мощности применение бетатронов ограничено. Одни из причин, не позволяющих повысить мощность бетатрона: плохая фокусировка магнитного поля бетатрона, и как следствие малая мощность дозы ионизирующего излучения на выходе из мишени, а также перегрев в процессе работы, который может привести к поломке.

Таким образом, задача исследования магнитного и теплового поля для определения и настройки основных параметров магнитного поля обладает высокой актуальностью среди производителей бетатронов.

Данная часть выпускной квалификационной работы посвящена исследованию и моделированию магнитного и теплового поля с использованием программ конечно-элементного анализа.

Целью данного раздела является оценка коммерческого и инновационного потенциала научно-исследовательской работы (НИР), планирование процесса управления НИР, определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности.

### **4.1.1 Технико-экономическое обоснование научно-исследовательской работы**

На данный момент настройка магнитного поля бетатрона производится вручную. Процесс настройки может занимать от 7 до 30 дней. По этой причине, производители бетатронов пытаются найти альтернативные способы настройки с меньшими затратами ресурсов.

В данном разделе выпускной квалификационной работы производится анализ экономической выгоды внедрения программ конечно-элементного анализа для отрасли бетатроностроения. Внедрение альтернативных вариантов настройки бетатронов представляют коммерческую привлекательность для разработчиков. Разработка данной технологии настройки бетатронов отвечает современным требованиям ресурсоэффективности.

Согласно экспертной оценке использование программ конечно-элементного анализа позволит сократить время настройки бетатрона более чем в 3 раза. Кроме того, основной этап работы производится за компьютером, и не требует непосредственной работы с оборудованием при переборе составных частей. Таким образом, разрабатываемая методика является ресурсоэффективным решением.

#### **4.1.2 Потенциальные потребители результатов исследования**

Для анализа потребителей услуг по разработке альтернативного способа настройки бетатронов был рассмотрен целевой рынок и проведено его сегментирование.

При учете специфики проводимого исследования в результате сегментирования была выбрана область «бетатроностроение», являющаяся отраслью «приборостроения». Таким образом, потенциальными потребителями результатов ВКР являются предприятия, занимающиеся производством циклических ускорителей, в том числе бетатронов.

Бетатроностроение относится к высокотехнологичному мелкосерийному производству. Предприятия такого рода стремятся к ресурсоэффективным технологиям, позволяющим повысить рентабельность производства. Внедрение программ конечно-элементного анализа позволяет повысить рентабельность данного мелкосерийного производства.

Заказчиком проводимого исследования является компания John Macleod Electronics, Ltd (Великобритания), занимающаяся эксплуатирование малогабаритных бетатронов.

Заинтересованность заказчиков в проведении исследования повышает коммерческий потенциал проводимого исследования.

#### **4.1.3 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.

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.

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Конкурент 1 - «PowerScan» (г. Пекин, Китай)

Конкурент 2 – Физико-электротехническая компания «Хуари» (г. Дандун, Китай)

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i * \text{Б}_i \quad (22)$$

, где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;  $B_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $\text{Б}_i$  – балл i-го показателя

Таблица 5 – Оценочная карта сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,06	5	5	4	0,3	0,3	0,24
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,05	5	5	4	0,25	0,25	0,2
3. Помехоустойчивость	0,04	5	4	5	0,2	0,16	0,2
4. Энергоэкономичность	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15
5. Надежность	0,07	4	4	4	0,28	0,28	0,28
6. Уровень шума	0,04	5	3	3	0,2	0,12	0,12
7. Безопасность	0,04	5	4	4	0,2	0,16	0,16
8. Потребность в ресурсах памяти	0,04	4	4	4	0,16	0,16	0,16
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,04	5	5	4	0,2	0,2	0,16
10. Простота эксплуатации	0,04	5	4	3	0,2	0,16	0,12
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,04	5	4	3	0,2	0,16	0,12
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,08	5	5	4	0,4	0,4	0,24
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность продукта	0,06	5	5	4	0,3	0,3	0,24
2. Уровень проникновения на рынок	0,05	4	5	4	0,2	0,25	0,2
3. Цена	0,05	5	4	5	0,25	0,2	0,25
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
5. Послепродажное обслуживание	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
6. Финансирование научной разработки	0,06	5	4	4	0,3	0,24	0,24
7. Срок выхода на рынок	0,05	3	4	3	0,15	0,2	0,15
8. Наличие сертификации разработки	0,04	3	3	4	0,12	0,12	0,16
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>93</b>	<b>86</b>	<b>79</b>	<b>4,66</b>	<b>4,36</b>	<b>3,88</b>

Вывод по пункту: Сравнение конкурентных технических решений показало, что проводимое исследование является конкурентоспособным и превосходит по показателям известных нам конкурентов.

#### 4.1.4 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Таблица 6 – Матрица SWOT-анализа

<b>Сильные стороны:</b> 1. Не требует помещения для настройки; 2. Не расходуется материал; 3. Конкурентноспособная цена; 4. Высокий уровень оплаты труда; 5. Наличие обучения новых сотрудников.	<b>Слабые стороны:</b> 1. Отсутствие мощного вычислительного; 2. Отсутствия опыта работы с программами конечно-элементного анализа; 3. Сложность в подтверждении полученных результатов; 4. Несовершенство программ; 5. Низкая распространённость данного метода альтернативной настройки излучателя бетатрона.
<b>Возможности:</b> 1. Сокращение времени настройки излучателя бетатрона; 2. Новые рабочие места для молодых специалистов; 3. Выход на рынок с низким уровнем конкуренции; 4. Наличие заинтересованных каналов сбыта в г.Томске и за рубежом; 5. Наличие в г.Томске профильных учебных заведений.	<b>Угрозы риски:</b> 1. Несоответствие теоретических расчетов; 2. Ограничение на экспорт технологии; 3. Наличие барьеров для входа на рынок.

Вывод по пункту: Проведенный swot-анализ показал, что альтернативный способ настройки излучателей бетатронов имеет большие перспективы, обоснованные ресурсоэффективностью предлагаемого метода, а именно:

- Сокращение время-затрат;
- Полное устранение расхода материала во время переборки.

Повышение ресурсоэффективности ведет к росту заработных плат, а следовательно, заинтересованности молодых специалистов в данной отрасли производства.

Минимизировать угрозы возможно закупкой мощных вычислительных устройств, при помощи которых будет проводиться анализ и настройка. Устранение такой угрозы, как «несоответствие теоретических и экспериментальных данных» осуществимо при профессиональной переподготовке сотрудников.

Вывод по разделу: Проведенный анализ коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения показал, что тема НИР обладает такими показателями, как ресурсоэффективность, высокий коммерческий потенциал, конкурентоспособность и др.

## 4.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Реализация научно-исследовательского проекта по разработке методики настройки магнитного и теплового поля малогабаритного бетатрона состоит из 13 основных этапов, которые составляют структуру научного исследования. Перечень этапов, работ и распределение исполнителей представлено в таблице 3.

Таблица 7 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер (дипломник)
	3	Выбор направления исследований	Руководитель, инженер (дипломник)
	4	Календарное планирование работ по теме	Инженер (дипломник)
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Проведение анализа литературы по теме ВКР	Инженер (дипломник)
	6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер (дипломник)

	7	Построение моделей и проведение моделирования	Инженер (дипломник)
	8	Сопоставление результатов моделирования с реальными данными	Инженер (дипломник)
	9	Повторная корректировка моделируемой модели	Инженер (дипломник)
	10	Контроль результатов исследований	Руководитель темы
Представление полученных результатов	11	Написание научных статей по тематике проведенных исследований	Инженер (дипломник)
	12	Совместная перепроверка статьи с научным руководителем	Руководитель, инженер (дипломник)
Обобщение и оценка результатов	13	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, инженер (дипломник)

Инженер-дипломник принимает участие в 12 этапах из 13; научный руководитель – в пяти этапах.

#### 4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Стоимость разработки, как правило, зависит от трудовых затрат персонала. Трудоемкость выполнения научного исследования оценена экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, так как зависит от множества трудно учитываемых факторов.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов [16]. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости  $t_{ожі}$  используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (23)$$

, где  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;  $t_{mini}$  – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости выполнения 1-й работы составило:

$$t_{\text{ож.1}} = \frac{3 * 2 + 2 * 4}{5} = 2,8 \text{ чел. -дн.}$$

Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости выполнения 2-й работы составило:

$$t_{\text{ож.2}} = \frac{3 * 2 + 2 * 5}{5} = 3,2 \text{ чел. -дн.}$$

Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости выполнения 3-й работы составило:

$$t_{\text{ож.3}} = \frac{3 * 1 + 2 * 2}{5} = 1,4 \text{ чел. -дн.}$$

Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости выполнения 4-й работы составило:

$$t_{\text{ож.4}} = \frac{3 * 2 + 2 * 3}{5} = 2,4 \text{ чел. -дн.}$$

Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости выполнения 5-й работы составило:

$$t_{\text{ож.5}} = \frac{3 * 10 + 2 * 15}{5} = 12 \text{ чел. -дн.}$$

Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости выполнения 6-й работы составило:

$$t_{\text{ож.6}} = \frac{3 * 10 + 2 * 15}{5} = 12 \text{ чел. -дн.}$$

Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости выполнения 7-й работы составило:

$$t_{\text{ож.7}} = \frac{3 * 30 + 2 * 60}{5} = 42 \text{ чел. -дн.}$$

Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости выполнения 8-й работы составило:

$$t_{\text{ож.8}} = \frac{3 * 2 + 2 * 5}{5} = 3,2 \text{ чел. -дн.}$$

Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости выполнения 9-й работы составило:

$$t_{\text{ож.9}} = \frac{3 * 10 + 2 * 20}{5} = 14 \text{ чел. -дн.}$$

Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости выполнения 10-й работы составило:

$$t_{\text{ож.10}} = \frac{3 * 2 + 2 * 3}{5} = 2,4 \text{ чел. -дн.}$$

Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости выполнения 11-й работы составило:

$$t_{\text{ож.11}} = \frac{3 * 3 + 2 * 5}{5} = 3,8 \text{ чел. -дн.}$$

Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости выполнения 12-й работы составило:

$$t_{\text{ож.12}} = \frac{3 * 1 + 2 * 3}{5} = 1,8 \text{ чел. -дн.}$$

Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости выполнения 12-й работы составило:

$$t_{\text{ож.12}} = \frac{3 * 2 + 2 * 4}{5} = 2,8 \text{ чел. -дн.}$$

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определена продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями, по формуле:

$$T_{p_i} = \frac{t_{\text{ож}i}}{Ч_i} \quad (24)$$

, где  $T_{p_i}$  – продолжительность одной работы, раб. дн.;  $t_{\text{ож}i}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;  $Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Продолжительность 1-й работы:

$$T_{p1} = \frac{2,8}{1} = 2,8 \text{ раб. дн.}$$

Продолжительность 2-й работы:

$$T_{p2} = \frac{3,2}{1} = 3,2 \text{ раб. дн.}$$

Продолжительность 3-й работы:

$$T_{p3} = \frac{1,4}{2} = 0,7 \text{ раб. дн.}$$

Продолжительность 4-й работы:

$$T_{p4} = \frac{2,4}{1} = 2,4 \text{ раб. дн.}$$

Продолжительность 5-й работы:

$$T_{p5} = \frac{12}{1} = 12 \text{ раб. дн.}$$

Продолжительность 6-й работы:

$$T_{p6} = \frac{12}{1} = 12 \text{ раб. дн.}$$

Продолжительность 7-й работы:

$$T_{p7} = \frac{42}{1} = 42 \text{ раб. дн.}$$

Продолжительность 8-й работы:

$$T_{p8} = \frac{3,2}{1} = 3,2 \text{ раб. дн.}$$

Продолжительность 9-й работы:

$$T_{p9} = \frac{14}{1} = 14 \text{ раб. дн.}$$

Продолжительность 10-й работы:

$$T_{p10} = \frac{2,4}{1} = 2,4 \text{ раб. дн.}$$

Продолжительность 11-й работы:

$$T_{p11} = \frac{3,8}{1} = 3,8 \text{ раб. дн.}$$

Продолжительность 12-й работы:

$$T_{p12} = \frac{1,8}{2} = 0,9 \text{ раб. дн.}$$

Продолжительность 13-й работы:

$$T_{p13} = \frac{2,8}{2} = 1,4 \text{ раб. дн.}$$

Вывод по пункту: Наиболее трудоемкими этапами работы 5, 6, 7 и 9. По продолжительности выполнения работ также больше всего времени занимают 5, 6, 7 и 9 пункты.

#### 4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

С целью построения ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта длительность каждого из этапов работ из рабочих дней переведена в календарные дни. Для этого была использована следующая формула:

$$T_{ki} = T_{pi} * k_{\text{кал}} \quad (25)$$

, где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;  $T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;  $k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определен по следующей формуле [17]:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} \quad (26)$$

, где  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году;  $T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году;  $T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году.

Коэффициент календарности в 2017 году составил:

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 118} = 1,477$$

Продолжительность выполнения 1-й работы в календарных днях

$$T_{k1} = 2,8 * 1,477 = 4 \text{ кал. дн.}$$

Продолжительность выполнения 2-й работы в календарных днях

$$T_{k2} = 3,2 * 1,477 = 5 \text{ кал. дн.}$$

Продолжительность выполнения 3-й работы в календарных днях

$$T_{k3} = 0,7 * 1,477 = 1 \text{ кал. дн.}$$

Продолжительность выполнения 4-й работы в календарных днях

$$T_{k4} = 2,4 * 1,477 = 4 \text{ кал. дн.}$$

Продолжительность выполнения 5-й работы в календарных днях

$$T_{k5} = 12 * 1,477 = 18 \text{ кал. дн.}$$

Продолжительность выполнения 6-й работы в календарных днях

$$T_{k6} = 12 * 1,477 = 18 \text{ кал. дн.}$$

Продолжительность выполнения 7-й работы в календарных днях

$$T_{k7} = 42 * 1,477 = 62 \text{ кал. дн.}$$

Продолжительность выполнения 8-й работы в календарных днях

$$T_{k8} = 32 * 1,477 = 5 \text{ кал. дн.}$$

Продолжительность выполнения 9-й работы в календарных днях

$$T_{k9} = 14 * 1,477 = 21 \text{ кал. дн.}$$

Продолжительность выполнения 10-й работы в календарных днях

$$T_{k10} = 2,4 * 1,477 = 4 \text{ кал. дн.}$$

Продолжительность выполнения 11-й работы в календарных днях

$$T_{k12} = 3,8 * 1,477 = 6 \text{ кал. дн.}$$

Продолжительность выполнения 12-й работы в календарных днях

$$T_{k13} = 0,9 * 1,477 = 1 \text{ кал. дн.}$$

Продолжительность выполнения 13-й работы в календарных днях

$$T_{k13} = 1,4 * 1,477 = 2 \text{ кал. дн.}$$

Наиболее продолжительные работы – 7 и 9 этапы. Все рассчитанные значения сведены в таблицу 8.

Таблица 8 – Временные показатели проведения научного исследования

Название	Трудоёмкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях, $T_{pi}$	Длительность работ в календарных днях, $T_{ki}$
	$t_{min}$ , чел-дни	$t_{max}$ , чел-дни	$t_{ож}$ , чел-дни			
Составление и утверждение технического задания	2	4	2,8	Руководитель темы	2,8	4
Подбор и изучение материалов по теме	2	5	3,2	Инженер (дипломник)	3,2	5
Выбор направления исследований	1	2	1,4	Руководитель, инженер (дипломник)	0,7	1
Календарное планирование работ по теме	2	3	2,4	Инженер (дипломник)	2,4	4
Проведение анализа литературы по теме ВКР	10	15	12	Инженер (дипломник)	12	18
Проведение теоретических расчетов и обоснований	10	15	12	Инженер (дипломник)	12	18
Построение моделей и проведение моделирования	30	60	42	Инженер (дипломник)	42	62
Сопоставление результатов моделирования с реальными данными	2	5	3,2	Инженер (дипломник)	3,2	5
Повторная корректировка моделируемой модели	10	20	14	Инженер (дипломник)	14	21
Контроль результатов исследований	2	3	2,4	Руководитель темы	2,4	4
Написание научных статей по тематике	3	5	3,8	Инженер (дипломник)	3,8	6

проведенных исследований						
Совместная перепроверка статьи с научным руководителем	1	3	1,8	Руководитель, инженер (дипломник)	0,9	1
Оценка эффективности полученных результатов	2	4	2,8	Руководитель, инженер (дипломник)	1,4	2

Таблица 9 – календарный план график проведения НИОКР

№ работ	Вид работ	Исполнители	$T_{ki}$ , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ																				
				декабрь			январь			февраль			март			апрель			май			июнь		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель темы	4	█																				
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер (дипломник)	5	█																				
3	Выбор направления исследований	Руководитель, инженер (дипломник)	1	█																				
4	Календарное планирование работ по теме	Инженер (дипломник)	4		█																			
5	Проведение анализа литературы по теме ВКР	Инженер (дипломник)	18		█	█	█																	
6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер (дипломник)	18				█	█	█															
7	Построение моделей и проведение	Инженер (дипломник)	62							█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█



Вывод: Разработанный календарный план-график показывает, что наиболее времязатратными являются такие пункты, как «построение моделей и проведение моделирования», повторная корректировка модели» и др. На «построение модели» отведено 62 календарных дня, а на «повторную корректировку модели» - 21 день. В ходе НИР руководитель темы задействован в течение 12 календарных дней, инженер-дипломник – в течение 147 календарных дней. Общая продолжительность работ в календарных днях составила 151 день.

### **4.3 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)**

При планировании бюджета НТИ учтены следующие виды расходов:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

#### **4.3.1 Расчет затрат на сырье и материалы НТИ**

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта:

- приобретаемые со стороны сырье и материалы, необходимые для создания научно-технической продукции;
- покупные материалы, используемые в процессе создания научно-технической продукции для обеспечения нормального технологического процесса и для упаковки продукции или расходуемых на другие производственные и хозяйственные нужды (проведение испытаний, контроль,

содержание, ремонт и эксплуатация оборудования, зданий, сооружений, других основных средств и прочее), а также запасные части для ремонта оборудования, износа инструментов, приспособлений, инвентаря, приборов, лабораторного оборудования и других средств труда, не относимых к основным средствам, износ спецодежды и других малоценных и быстроизнашивающихся предметов;

- покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, подвергающиеся в дальнейшем монтажу или дополнительной обработке;

- сырье и материалы, покупные комплектующие изделия и полуфабрикаты, используемые в качестве объектов исследований (испытаний) и для эксплуатации, технического обслуживания и ремонта изделий – объектов испытаний (исследований). Затраты на материалы представлены в таблице 5.

Таблица 10 – Стоимость материалов

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, (З <sub>м</sub> ), руб.
Ручка	шт.	3	60	180
Карандаш	шт.	3	20	60
Ластик	шт.	2	15	30
Линейка	шт.	1	30	30
Транспортир	шт.	1	35	35
Маркеры	шт.	3	60	180
Степлер	шт.	1	100	100
Скобы для степлера	шт.	2	45	90
Бумага офисная	л.	500	0,4	200
Термопаста для ноутбука	шт.	1	350	350
Итого				1255

Материалы и сырье берутся с запасом.

#### 4.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ по теме научного исследования. Затраты на оборудование представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Стоимость оборудования

Наименование оборудования	Цена, руб.
Программа конечно-элементного анализа Elcut 6.2	118 950

В стоимость данного пакета входят все модули, представленные в версии 6.2, а также консультация в течение полугода.

### 4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Основная заработная плата руководителей рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда, которая предполагает состав заработной платы:

1) Оклад – определяется предприятием. Оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, старший преподаватель, доцент, профессор.

2) Стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд и т.д.

3) Иные выплаты; районный коэффициент.

Заработная плата руководителя темы и инженеров (дипломников)-3-х человек, непосредственно участвующих в выполнении работ по моделированию (включая премии, доплаты), включает основную заработную плату и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (27)$$

, где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;  $Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата (15 % от  $Z_{осн}$ ).

Основная заработная плата ( $Z_{осн}$ ) руководителя темы, инженеров (дипломников) рассчитана по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p \quad (28)$$

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} \quad (29)$$

,где  $Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб.;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

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

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{тс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}} \quad (30)$$

,где  $Z_{\text{тс}}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;  $k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент;  $k_{\text{д}}$  – коэффициент доплат и надбавок;  $k_{\text{р}}$  – районный коэффициент.

Месячный должностной оклад руководителя темы, руб.:

$$Z_{\text{м}} = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,3) \cdot 1,3 = 54704$$

Месячный должностной оклад инженера (дипломника), руб.:

$$Z_{\text{м}} = 17000 \cdot (1 + 0,2 + 0,2) \cdot 1,3 = 30940$$

Таблица 12 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель темы	Инженер (дипломник)
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	105	105
- праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
- отпуск	28	28
- невыходы по болезни	14	4
Действительный годовой фонд рабочего времени	204	214

Среднедневная заработная плата руководителя темы, руб.:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{54704 \cdot 10,4}{204} = 2788,83$$

Среднедневная заработная плата инженера (дипломника), руб.:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{30940 * 11,2}{214} = 1619,29$$

Рабочее время:

Руководитель:

$$T_p = 8.2 \text{ округляем в большую сторону } T_p = 9 \text{ раб.дн}$$

Инженер:

$$T_p = 95.6 \text{ округляем в большую сторону } T_p = 96 \text{ раб.дн}$$

Основная заработная плата руководителя темы составила:

$$Z_{\text{осн}} = 2788.83 * 9 = 25099,47 \text{ руб.}$$

Основная заработная плата инженера (дипломника) составила:

$$Z_{\text{осн}} = 1619,29 * 96 = 155451,84 \text{ руб.}$$

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 9.

Таблица 13 – Расчёт основной заработной платы руководителя темы и инженера (дипломника) непосредственно участвующих в выполнении работ по разработке методики моделирования магнитного и теплового поля малогабаритного бетатрона.

Исполнители	$Z_{\text{тс}}$ , руб.	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{д}}$	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}$ , руб.	$Z_{\text{дн}}$ , руб.	$T_p$ , раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$ , руб.
Руководитель темы	26300	0,3	0,3	1,3	54704	2788,83	9	25099,47
Инженер (дипломник)	17000	0,2	0,2	1,3	30940	1619,29	96	155451,84
Итого $Z_{\text{осн}}$								180551,31

Вывод по пункту: Таким образом, затраты на основную заработную плату составили 180551,31 руб. При том, что заработная плата руководителя больше, инженер-дипломник был задействован в течении большего рабочего времени. Так, зарплата инженера составила по расчетам 155451,84 руб.

#### 4.3.4 Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем – 12 % от суммы основной заработной платы).

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} \quad (31)$$

где  $Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата, руб.;  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной зарплаты;  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата, руб.

Таблица 14 – Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Основная зарплата	25099,47	155451,84
Дополнительная зарплата	2509,95	15545,18
Итого, руб	198606,44	

Вывод по пункту: В данном пункте произвели расчет дополнительной и общей заработной платой руководителя и инженера. Суммарная заработная плата руководителя и инженера составила 198606,44руб.

#### 4.3.5 Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (32)$$

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

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} * (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0.3 * 198606,44 = 59581,93 \text{ руб.}$$

Вывод по пункту: Отчисления в социальные нужды составили 0.3 от общей суммы заработной платы, что составило 59581,93 рубля.

#### **4.3.6 Накладные расходы**

Накладные расходы учитывают прочие затраты, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, электроэнергия, размножение материалов и т.д. Их величина определена по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 3) \cdot k_{\text{нр}} \quad (33)$$

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

Величина коэффициента накладных расходов взята в размере 10%.

Накладные расходы составили:

$$Z_{\text{накл}} = (1255 + 118950 + 180551,31) * 0,1 = 30075,63 \text{ руб}$$

Вывод по пункту: Коэффициент накладных расходов был взят равным 10% от суммы статей расчета затрат на сырье, оборудование и зарплату работников. Накладные расходы составили 30075,63 рубля.

#### **4.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.**

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведено в таблице 11.

В ходе формирования бюджета затрат НИИ были сведены воедино все статьи, по которым производился расчет затрат. Для более глубокого анализа в таблице приведены затраты бюджет затрат на научно-исследовательские проекты конкурентов[18]. Оцениваемые затраты конкурентов основывались на заключениях специалистов.

Конкурент 1 – «PowerScan» (г. Пекин, Китай)

Конкурент 2 – Физико-электротехническая компания «Хуари» (г. Дандун, Китай)

Таблица 15 – Расчет бюджета затрат НИТ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Оцениваемые затраты конкурентов, руб	
		Конкурент 1 «PowerScan»	Конкурент 2 «Хуари»
1. Материальные затраты НИТ	1255	2000	3500
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	118950	389000	327000
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	180551,31	200000	143815
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	198606,44	30000	25000
5. Отчисления во внебюджетные фонды	59581,93	69000	50644.5
6. Накладные расходы	30075,63	59100	46431.5
7. Бюджет затрат НИТ	589020,31	749100	596391

Вывод по пункту: Таким образом, бюджет затрат НИТ составляет 589020,31 руб. Сравнение результатов таблицы показывает, что наши разработки являются более экономически-выгодными по сравнению с предложениями конкурентов. Стоимость проекта входит в обозначенные бюджетные проекты в начале исследования.

Вывод по разделу: Наиболее затратной статьей в ходе выполнения НИР является затраты на оплату труда и закупка специального оборудования (программного обеспечения). Общая стоимость НИР составляет 589020,31 рублей, что намного ниже, чем оцениваемая стоимость проведения таких же работ у конкурентов. Относительно низкая стоимость проекта показывает о высоком коммерческом потенциале исследования.

#### 4.4 Оценка научно-технического уровня НИР

Одним из наиболее важных результатов проведения НИР является его научно-технический уровень. Для определения научно - технического уровня

проекта, его научной ценности, технической значимости и эффективности необходимо, рассчитать коэффициент научно-технического уровня (НТУ).

Коэффициент НТУ рассчитывается при помощи метода балльных оценок. Суть метода состоит в присвоении каждому из признаков НТУ определенного числа баллов по принятой шкале. Общую оценку приводят по сумме баллов по всем показателям с учетом весовых характеристик.

Формула для определения общей оценки:

$$\text{НТУ} = \sum_{i=1}^n k_i * \Pi_i \quad (34)$$

,где  $k_i$  – весовой коэффициент  $i$  – го признака;  $\Pi_i$  – количественная оценка  $i$  – го признака.

Таблица 16 – Весовые коэффициенты признаков НТУ

Признак НТУ	Примерное значение весового коэффициента
1. Уровень новизны	0,6
2. Теоретический уровень	0,4
3. Возможность реализации	0,2

Таблица 17 – Баллы для оценки уровня новизны

Уровень новизны	Характеристика уровня новизны	Баллы
Принципиально новая	Новое направление в науке и технике, новые факты и закономерности, новая теория, способ	8-10
Новая	По-новому объясняются те же факты, закономерности, новые понятия, дополняют ранее полученные результаты	5-7
Относительно новая	Систематизируются, обобщаются имеющиеся сведения, новые связи между известными факторами	2-4
Не обладает новизной	Результат, который ранее был известен	0

Таблица 18 – Баллы значимости теоретических уровней

Теоретический уровень полученных результатов	Баллы
1. Установка закона, разработка новой теории	10
2. Глубокая разработка проблемы, многоспектральный анализ, взаимодействия между факторами с наличием объяснений	8
3. Разработка способа (алгоритм, программа и т. д.)	6
4. Элементарный анализ связей между фактами (наличие гипотезы, объяснения версии, практических рекомендаций)	2
5. Описание отдельных элементарных факторов, изложение наблюдений, опыта, результатов измерений	0,5

Таблица 19 – баллы для оценки времени реализации и масштаба реализации

<u>Время реализации</u>	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	4
Свыше 10 лет	2
<u>Масштабы реализации</u>	Баллы
Одно или несколько предприятий	2
Отрасль	4
Народное хозяйство	10

Результаты оценок признаков отображены в таблице 16.

Таблица 20 – Количественная оценка признаков НИОКР

Признак научно-технического эффекта НИР	Характеристика признака НИОКР	$K_i$	$\Pi_i$
1. Уровень новизны	По-новому объясняются те же факты, закономерности, новые понятия	0,6	7
2. Теоретический уровень	Разработка способа (алгоритм, программа мероприятий, устройство, вещество и т.п.)	0,4	6
3. Возможность реализации	Время реализации в течение первых лет	0,2	10
4. Масштабы реализации	Одно или несколько предприятий	0,2	2

Используя исходные данные по основным признакам научно-технической эффективности, определяем показатель научно - технического уровня:

$$НТУ=0,6*7+0,4*6+0,2*10+0,2*2=9$$

Вывод по пункту: По полученным результатам можно сделать вывод, что данный проект имеет хорошие показатели новизны, значимость теоретического уровня, и при этом используется в широком спектре отраслей за сравнительно небольшое время реализации.

## **Заключение**

Проведенные расчеты показали, что разрабатываемый метод превосходит по экономическим показателям методики конкурентов и является ресурсоэффективным. Дальнейшие исследования в данной области позволят существенно сократить время настройки физических полей бетатрона, что позитивно скажется на его себестоимости.

Был проведен swot-анализ по выявлению сильных и старых работ, возможностей и угроз. Уменьшение влияния угроз осуществляется закупкой более мощных вычислительных устройств. Профессиональная переподготовка сотрудников позволит также позволит минимизировать угрозы.

Расчет коэффициента календарности позволил план график научно-технического исследования. Содержание работ для проведения исследования составило 13 пунктов. Для иллюстрации календарного графика была использована диаграмма Ганта, обладающая высокой степенью информативности. Общая продолжительность исследования составила 151 день.

Проведенный расчет стоимости НИИ показал, что общая стоимость составляет 345482.52 рублей и не превосходит по стоимости конкурентов, ближайшая стоимость которых составляет примерно 586391 рублей.

Таким образом, можно сделать вывод, что проводимое исследование обладает высокой ресурсоэффективностью. Данное научное исследование обладает как коммерческим, так и инновационным потенциалом. Результаты данной НИР могут быть применены на предприятиях, занимающихся разработкой и эксплуатированием ускорителей для повышения рабочих характеристик устройств.

## Список публикаций студента

По тематике ВКР студентом написаны следующие публикации:

1. Zatonov I. -, Shteyn M. M. Numerical simulation of the betatron magnetic field using ELCUT software // MATEC Web of Conferences . - 2016 - Vol. 48, Article number 03007 . - p. 1-7
2. Shteyn M. M. , Smekalin L. F. , Stepanov S. A. , Zatonov I. -. , Tkacheva T. V. , Usachev E. Y. Studying radiation hardness of a cadmium tungstate crystal based radiation detector // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2016 - Vol. 135, Article number 012042. - p. 1-6
3. Затонов И. -. Измерение кривой тепловых потерь для электротехнической стали 3408 при однополярном импульсном напряжении питания [Электронный ресурс] // Студенческий научный форум - 2017: IX Международная студенческая электронная научная конференция , Москва, 15 Февраля-30 Марта 2017. - Москва: РАЕ, 2017 - С. 1-5. - Режим доступа: <http://www.scienceforum.ru/2017/2358/31542>
4. Дружинин К. П. , Рудьковский Д. Н. , Затонов И. -. Бетатрон с дуальной энергией // Информационно-измерительная техника и технологии: материалы VII научно–практической конференции, Томск, 25-28 Мая 2016. - Томск: ТГУ, 2016 - С. 59-62