

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 14.04.02 Ядерная физика и технологии
 Отделение школы (НОЦ) Отделение ядерно-топливного цикла

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Расчет магнитного поля при реконструкции основной обмотки электромагнита циклотрона У400М

УДК 621.384.633:537.612

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM01	Басс Вадим Игоревич		

Руководители

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель группы СФУ ЛЯР ОИЯИ	Иваненко И.А.	к.т.н.		
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ ТПУ	Дорофеева Л.И.	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Клемашева Е.И.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Передерин Ю.В.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Изотопные технологии и материалы	Видяев Д.Г.	д.т.н.		

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код компетенции	Результаты освоения ООП (компетенции)
Универсальные	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
ОПК(У)-3	Способен оформлять результаты научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен использовать фундаментальные законы в объеме достаточном для самостоятельного комбинирования и синтеза новых идей, творческого самовыражения
ПК(У)-2	Способен создавать новые методы расчета современных физических установок и устройств, разрабатывать методы и перспективные технологии
ПК(У)-3	Способен создавать математические и физические модели, описывающие процессы и явления в разделительных каскадах, установках разделения и тонкой очистки веществ, переработки и обезвреживания промышленных отходов
ПК(У)-4	Способен оценить перспективы развития ядерной отрасли, использовать её современные достижения и передовые технологии в научно-исследовательских работах
ПК(У)-5	Способен самостоятельно выполнять экспериментальные и теоретические исследования для решения научных и производственных задач с использованием современных приборов для научных исследований и математических методов расчета
ПК(У)-6	Способен провести расчет, концептуальную и проектную разработку современных физических установок и приборов
ПК(У)-7	Способен формулировать технические задания, использовать информационные технологии и пакеты прикладных программ при проектировании и расчете физических установок, использовать знания методов анализа эколого-экономической эффективности при проектировании и реализации проектов
ПК(У)-8	Способен к объективному анализу технических и расчетно-теоретических разработок, решений и проектов, учету их соответствия требованиям законов в области промышленности, экологии, технической, радиационной и ядерной безопасности, другим нормативным актам на российском и международном уровне, подготовить экспертное заключение
ПК(У)-9	Готовность к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования и дополнительного профессионального образования (ДПО)
ПК(У)-10	Способен разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов, управлять программами освоения новой продукции и технологии

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

Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии

Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

_____ Видяев Д.Г.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
0АМ01	Бассу Вадиму Игоревичу

Тема работы:

Расчет магнитного поля при реконструкции основной обмотки электромагнита циклотрона У400М	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 32-51/С от 01.02.2022

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2022 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Задание. Литературные источники по принципам действия циклических ускорителей, по компьютерному моделированию, по программной реализации математических моделей. Двухмерная компьютерная модель магнитопровода изохронного циклотрона У-400М в соответствии с чертежами из библиотеки ЛЯР.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Обзор и анализ литературы 2. Построение компьютерной модели магнитопровода циклотрона У-400М 3. Результаты расчетов, их анализ 4. Экономический расчет 5. Охрана труда и техника безопасности 6. Выводы. Заключение

Перечень графического материала	Графики: 1. Первый циклотрон, созданный Лоуренсоном и Ливингстоном 2. Развитие циклотронов различных типов, начиная с первого, построенного в 1930г 3. Принципиальная схема циклотрона 4. Схема ЭЦР источника ионов DECRIS-2 5. Трехмерная модель соленоида 6. Гиперболический инфлектор 7. Спиральный инфлектор 8. Циклотрон У-400. Лаборатория ядерных реакций им Г.Н. Флерова, ОИЯИ 9. Изохорный циклотрон для протонной терапии с магнитом броневого типа 10. Магниты с разделенными секторами в институте имени Пауля Шеррера в Швейцарии 11. Выводной патрубок с профилометром и люминофором 12. Изображение дуанта 13. Фотография ВЧ ускорительной системы циклотрона 14. Резонансная кривая инжектора 15. Циклотрон У-400М, ОИЯИ, Лаборатория Ядерных Реакций 16. Рабочая диаграмма циклотрона У-400М 17. Вид и основные размеры магнита циклотрона У-400М 18. Сечение сектора циклотрона У-400М 19. Основные элементы магнитопровода 20. Основные элементы рабочей области магнитной системы циклотрона 21. Модель магнита в программе TOSCA 1/2 главный вид 22. Модель магнита в программе TOSCA 1/2, вид верхней половины магнита 23. Модель сектора и элементов центра магнита в программе TOSCA 24. Компьютерная модель секторов электромагнита циклотрона У400М 25. Вид центральной области магнита 26. Сечения катушек электромагнита циклотрона У400М 27. Магнитные свойства стали Ст03 и Ст10, используемые в расчетах 28. ½ часть модели магнита с сеткой
---	---

	29. Распределение базового магнитного поля в медианной плоскости для модели электромагнита циклотрона У-400М 30. Изменение наклона среднего магнитного поля к радиусу вывода $R=1.78$ м при установке новых катушек в зависимости от уровня среднего поля на радиусе вывода 31. Сравнение результатов расчетов среднего магнитного поля с использованием новой катушки и старой катушки для уровня тока возбуждения электромагнита в 1600А 32. Приведенная к радиусу вывода $R_{\text{экст}} 1.78$ м разница магнитных полей расчетов среднего магнитного поля с новой и старой катушками для 5 уровней магнитного поля 33. Сравнение результатов измерений и расчетов для 5 уровней тока возбуждения электромагнита
--	---

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент Отделения социально-гуманитарных наук, к.э.н. Клемашева Е.И.
Социальная ответственность	Доцент Отделения ядерно-топливного цикла, к.т.н. Передерин Ю.В.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.02.2022
---	-------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель группы СФУ ЛЯР ОИЯИ	Иваненко И.А.	к.т.н.		01.02.2022

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM01	Басс В.И.		01.02.2022

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

Студенту:

Группа	ФИО
0AM01	Бассу Вадиму Игоревичу

Школа	ИЯТШ	Отделение	Отделение ядерно-топливного цикла
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Дубна, Московской области. Тарифная ставка исполнителя и руководителя определены штатным расписанием ОИЯИ ЛЯР
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	-30% премии; 1,15 районный коэффициент
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30,2%.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Анализ и оценка конкурентоспособности НИ; SWOT-анализ.
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	1.Цели и результат проекта. 2.Организационная структура проекта. 3.Ограничения и допущения проекта.
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Формирование плана и графика разработки: - организация работ НИ; - определение структуры работ; - разработка графика Ганта. Формирование бюджета затрат на НИ: - материальные затраты; - заработная плата; - отчисления во внебюджетные фонды.
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	1.Определение интегрального финансового показателя разработки; 2.Определение интегрального показателя ресурсоэффективности разработки; 3.Определение интегрального показателя эффективности; 4.Оценка абсолютной эффективности НИ.
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):	
1. Сегментирование рынка 2. Оценка конкурентоспособности технических решений 3. Матрица SWOT-анализа 4. Иерархическая структура работ 5. Диаграмма Ганта	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.02.22
---	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Клемашева Елена Игоревна	канд.экон. наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM01	Басс Вадим Игоревич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0AM01	Бассу Вадиму Игоревичу

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения

Моделирование магнитного поля циклотрона У-400М в OPERA 3D Tosca.
Область применения: физика ускорителей.
Работы проводились на базе Лаборатории Ядерных Реакций им. Флерова Объединенного Института Ядерных Исследований (ОИЯИ ЛЯР)..

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:
– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;
– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

– Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 24.04.2020);
– ГОСТ 22269-76. Система «человек-машина». Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. Общие эргономические требования.

2. Производственная безопасность:
2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов
2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия

Вредные и опасные факторы:
– отклонение показателей микроклимата;
– повышенный уровень электромагнитных излучений;
– недостаточная освещенность рабочей зоны;
– повышенный уровень шума;
– психофизиологические факторы;
– опасность поражения электрическим током.

3. Экологическая безопасность:

– анализ влияния объекта и процесса исследования на окружающую среду;
– разработка организационных и технических мероприятий по защите окружающей среды.

4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:

– выбор и описание типичной ЧС - пожар;
– обоснование мероприятий по предотвращению ЧС;
– порядок действий при возникновении ЧС.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.02.2022
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Передерин Ю.В.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM01	Басс Вадим Игоревич		

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация включает в себя: 121 страницу, 29 таблиц, 36 рисунков, 36 литературных источников.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, изохронный циклотрон, магнитное поле, обмотка.

Объектом исследования является изохронный циклотрон У-400М.

Цель работы: определение условий коррекции магнитного поля в области вывода пучка заряженных частиц из циклотрона У400М с целью его модернизации.

В работе произведено построение компьютерной модели магнитопровода изохронного циклотрона У400М в соответствии с чертежами библиотеки Лаборатории Ядерных Реакций ОИЯИ. За основу были взяты чертежи элементов магнитопровода циклотрона, переведенные в электронный вид в программе AutoCAD. При помощи Autodesk Inventor двумерные элементы магнитопровода были преобразованы в трехмерные. Полученные трехмерные элементы были импортированы в программу расчета магнитного поля Opera 3D Tosca, где были собраны в компьютерную модель электромагнита У-400М

Был проведен расчет и анализ магнитного поля циклотрона. Результаты расчетов магнитного поля обрабатывались программой BCALC, позволяющей получить все основные характеристики магнитного поля ускорителя. Расчеты показали, что изменение размеров и смещение центра масс катушки от исходного вносит изменения в магнитное поле циклотрона. Так, при установке новых катушек радиальный наклон среднего магнитного поля изменится к среднему радиусу вывода $R=1.78\text{м}$ на величину до 75Гс в зависимости от уровня основного поля, что в свою очередь меняет условия изохронизма в рабочих режимах циклотрона.

Оглавление

Введение.....	13
1. Теоретическая часть	14
1.1. История развития циклотронов.....	14
1.2. Основные виды циклических ускорителей.....	16
1.2.1. Классический циклотрон.....	16
1.2.2. Синхроциклотрон.....	17
1.2.3. Циклотроны с азимутальной вариацией магнитного поля.	18
1.2.4. Циклотроны с разделенными секторами.....	18
1.2.5. Сверхпроводящие циклотроны.....	18
1.3. Принцип работы циклотронов	19
1.3.1. Компоненты циклотрона	20
1.4. Базовые уравнения и формулы	31
2. Практическая часть	37
2.1. Изохорный циклотрон У-400М.....	37
2.2. Назначение и область применения	37
2.3. Построение компьютерной модели магнита	39
2.4. Магнитные свойства стали.....	46
2.5. Построение сетки.....	47
2.6. Расчет магнитного поля циклотрона	48
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение...	53
3.1 Предпроектный анализ	53
3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	53
3.1.2 Анализ конкурентных технических решений	54
3.1.3 SWOT-анализ.....	55

3.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации.....	58
3.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования.....	59
3.2 Инициация проекта	60
3.3. Реестр рисков проекта.....	62
3.4. Планирование научно-исследовательского проекта	63
3.5. Бюджет научного исследования	65
3.6. Оценка абсолютной эффективности НИ	71
3.6.1. Чистая текущая стоимость	71
3.6.2. Дисконтированный срок окупаемости.....	73
3.6.3. Внутренняя ставка доходности.....	74
3.7. Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности научного исследования	75
Выводы по разделу.....	78
4. Социальная ответственность	79
4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	79
4.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства	79
4.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	80
4.2 Производственная безопасность	83
4.2.1 Анализ вредных и опасных факторов.....	83
4.2.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия вредных и опасных факторов.....	84
4.2.3 Отклонение показателей микроклимата.....	84

4.2.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения	85
4.2.5 Недостаточная освещенность рабочей зоны	86
4.2.6 Превышение уровня шума	91
4.2.7 Психофизиологические факторы	91
4.2.8 Поражение электрическим током.....	92
4.3 Экологическая безопасность.....	94
4.4 Пожарная и взрывная безопасность	95
4.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	97
4.5.1 Анализ типичной ЧС при проведении исследования.....	97
Выводы по разделу.....	99
Выводы	100
Список использованной литературы.....	101
Приложение А	106

Введение

Циклотрон У400М является базовой экспериментальной установкой в Лаборатории Ядерных Реакций имени Г.Н. Флерова Объединенного Института Ядерных Исследований. Циклотрон У-400М позволяет ускорять частицы различных типов с различными отношениями числа стандартных единиц атомной массы к числу элементарных зарядов $A/Z = 2 - 10$ до энергии 80 - 5 МэВ/нуклон. На сегодняшний день проводится реконструкция циклотрона У-400М, основной целью которой является замена основной обмотки электромагнита, проведение измерений и оптимизации магнитного поля с целью повышения эффективности ускорения и вывода пучков заряженных частиц из циклотрона.

В работе проведено исследование, направленное на определение условий коррекции магнитного поля в области вывода пучка заряженных частиц из циклотрона У400М с целью его модернизации.

Представленная работа состоит из следующих этапов:

1. Построение трехмерной компьютерной модели циклотрона У400М.
2. Расчет магнитного поля циклотрона У-400М в случаях исходной и новой основной обмотки электромагнита.
3. Сравнительный анализ полученных результатов, определение способа компенсации полученных изменений магнитного поля циклотрона при замене основной обмотки.
4. Применение результатов расчета магнитного поля для траекторного анализа, который проводится в СФУ ЛЯР.

1. Теоретическая часть

1.1. История развития циклотронов

Впервые принцип действия магнитного резонансного ускорителя – циклотрона был сформулирован почти 100 лет назад. Благодаря своей универсальности, за это время при помощи циклотрона было изучено большое количество ядерных реакций и ускорены ионы практически всех химических элементов: от водорода до неона. В настоящее время циклотрон так же является наиболее распространенным типом ускорителей.

В 1919 Резерфорд предпринял попытки провести эксперимент по изучению атомных ядер. Он проводил опыты, в ходе которых сталкивал ядра азота с α -частицами, вылетающими из радиоактивного источника. Прибор для столкновения ядер представлял собой латунную камеру $18 \times 6 \times 2$ см с источником α -частиц в виде металлического диска, покрытого активным веществом и помещенного внутрь камеры, заполнявшуюся различными газами. В 1932 Джон Кокрофт и Эрнест Уолтон впервые сконструировали специальный 800-киловольтный генератор постоянного напряжения. Они ускорили протоны и направили их на мишень из лития. В этом эксперименте, частицы приобретали энергию за счет однократного прохождения области высокой разности потенциалов. Данный метод называется методом прямого ускорения частиц. Ускорители, работающие по этому методу, называются линейными ускорителями [1].

В 1930 году было получено первое сообщение о принципе циклического резонансного ускорителя без использования сверхвысокого напряжения. Далее в 1931 г Лоуренс и М Ливингстон впервые ускорили ионы молекулярного водорода на циклотроне с диаметром полюсов 100 мм. Год спустя те же ученые ускорили дейтоны до энергии 3.6 МэВ, на более совершенной установке. Частицы двигаются по окружности или спирали и неоднократно проходят ускоряющие промежутки. Ускорители, действующие по этому методу, называются циклическими ускорителями (Циклотрон).

В 1932 году на модернизированной установке Эдлефсен и Лоуренс ускоряют дейтоны до энергии 3,6 МэВ. С помощью измерительного электрода (цилиндр Фарадея), установленного за отклоняющей системой, был зарегистрирован ток 10^{-9} А. А в 1933 году произвели ускорение ионов водорода до энергии 4,8 МэВ. В установке применялся колебательный контур, состоящий из двух дуантов.

В 1934 году Лоуренс и Эдлефсен ускоряют ионы водорода до энергии 5 МэВ, а в 1936 году, построив новую камеру, Лоуренс и Куксей ускоряют дейтоны до 5 МэВ, впервые выпустив пучок заряженных частиц из камеры с силой тока 5 мкА.

В 1944 году Ливингстоном были опубликованы данные по установке, совершенно новой для того времени. Диаметр циклотрона равен 1050 мм, вес магнита 90 тонн. Ливингстон учел полученные в прошлом теоретические результаты и уделил особое внимание для коррекции магнитного поля. Коррекция осуществлялась стопками дисков, располагаемых в зазорах между крышками камеры и полюсными наконечниками. Подвижные закорачиваемые элементы были снабжены пружинящими контактами. Для приема пучков сконструировали вращающуюся мишень, позволяющую за счет распределения нагрузки на большую поверхность увеличить теплостойкость мишени. Помимо этого, Ливингстон нашел весьма удачное конструктивное решение для ряда элементов, что резко облегчило все операции, связанные с юстировкой, сборкой и разборкой отдельных узлов циклотрона. Большинство операций производилось дистанционно с центрального пульта управления. Ливингстон впервые обоснованно поставил вопрос о защите персонала от облучения и осуществил эффективные мероприятия по радиационной технике безопасности. После длительной наладки циклотронной установки Ливингстону удалось получить рекордный результат: дейтоны были ускорены до энергии 15 МэВ. Ток на конечном радиусе составлял около 1 мА,

а в выпущенном пучке около 100 мкА. Разность потенциалов на дуантах была при этом 140 кВ.

В том же году Крюгер с сотрудниками опубликовал сведения об интересном варианте циклотронной установки. Отклоняющая система позволяла выпускать пучок заряженных частиц в направлении, параллельном щели между дуантами. В этом случае ярмо магнита не припятствовало выводу пучка и установке анализирующего магнита. Создав разность потенциалов между дуантами 150 кВ, авторы ускорили дейтоны до 10 МэВ и получили в выпущенном пучке ток 100 мкА. На этой установке была сделана первая попытка монохроматизировать выпущенный из циклотрона пучок заряженных частиц. Для этого использовался анализирующий магнит, отклонивший пучок на 51° , а перед магнитом и после него устанавливались коллимирующие щели. Авторы получили пучок дейтонов с энергетическим разбросом 0,1 %.

В 1946 г. Тобиас и Сегрэ на полутораметровом циклотроне в Беркли ускорили ионы С до энергии 96 МэВ. Спустя несколько месяцев Йорк и др. на этой же установке ускорили ионы обоих изотопов углерода. В 1947 году в СССР был запущен первый полутораметровый циклотрон. В 1950 году были применены длинные выступы на дуантах для уменьшения фазовой группировки ионов. Выступы необходимы для уменьшения размеров области электрического поля вблизи источника.

1.2. Основные виды циклических ускорителей

1.2.1. Классический циклотрон

Лоуренс и Ливингстон построили первый классический циклотрон в 1930 году, который разгонял протоны до энергии 80 кэВ. Его диаметр составлял около 10 см (рисунок 1)

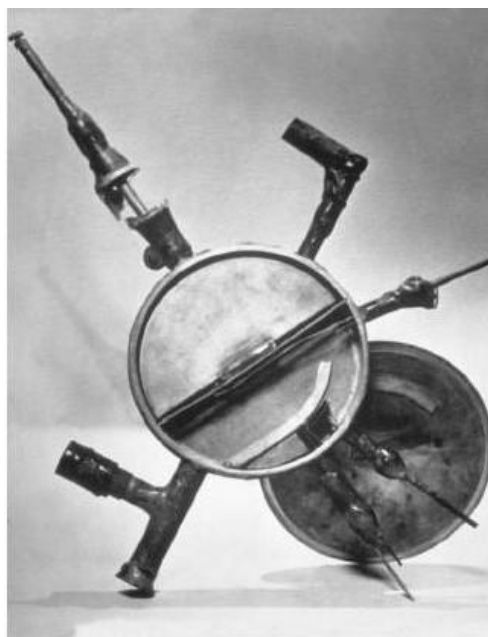


Рисунок 1 – Первый циклотрон, созданный Лоуренсоном и Ливингстоном

Циклотроны, в которых частота ускоряющего ВЧ-поля неизменна и поле магнита постоянно называются классическими. При этом данные циклотроны имели ограничения по энергии ускоряемых частиц. Магниты классических циклофонов имеют плоские полюса, создающие слабую вертикальную фокусировку. Такие циклотроны нуждались в модификациях, что и привело к их дальнейшему развитию [2-4].

1.2.2. Синхроциклотрон

В 1932-1937 годы для достижения более высоких энергий была сделана модификация циклотрона. Векслером и Микмилланом независимо был предложен принцип автофазировки. В синхроциклотроне обеспечена возможность перестройки частоты ускоряющего поля в течении цикла ускорения. В таких циклотронах, чтобы сохранить вертикальную фокусировку, магнитное поле спадает по радиусу. В процессе ускорения частота уменьшается для достижения релятивистской энергии. Синхроциклотрон прост в постройке и использовании. Однако получаемый в ускорителе пучок является импульсным и имеет низкую интенсивность, так как частицы ускоряются циклами [2,3].

1.2.3. Циклотроны с азимутальной вариацией магнитного поля.

В 1938 году Томас Люэлин показал, что в циклотроне можно ускорить заряженные частицы до больших энергий, если создать магнитное поле с азимутальной вариацией. К сожалению, в то время его идеи не получили развития и только в 1957 году был построен первый циклотрон с азимутальной вариацией магнитного поля (AVF). Благодаря этой модернизации в циклотроне возросло качество и интенсивность пучка, кроме того диапазон пучков (пучки тяжелых ионов, поляризованные пучки) и энергий расширился.

1.2.4. Циклотроны с разделенными секторами

Для увеличения глубины вариации магнитного поля кольцевого циклотрона потребовалась трансформация. В 1963 году Виллакс предложил вместо обычной магнитной системы использовать магнит с разделенными секторами. В пространстве между магнитами располагаются мощные ВЧ резонаторы, что дает более высокое ускоряющее напряжение, пучок легче извлечь и потери энергии не велики. Для того, чтобы сделать ускорение независимым от фазы индивидуальной частицы сгустка, путем занижения пика косинуса, ускоряющего ВЧ напряжения, пространство между секторами приобрело форму «равнин-холмов». Минусом этой модели, является то, что появляется необходимость введения отдельных пердускорителей в качестве инжекторов.

1.2.5. Сверхпроводящие циклотроны

Что бы снизить цену на производство электромагнитов, а также уменьшить их габариты, стали применять сверхпроводящие материалы. В конце 1970-х годов началось строительство первого сверхпроводящего циклотрона. И в 1983 году эта машина, получившая название Теватрон, была запущена в эксплуатацию. Такая установка весила в разы меньше обычных циклотронов (вес магнита 100 т), а ее энергия была сравнима с энергией установки с магнитом весом в 1700 т [4].

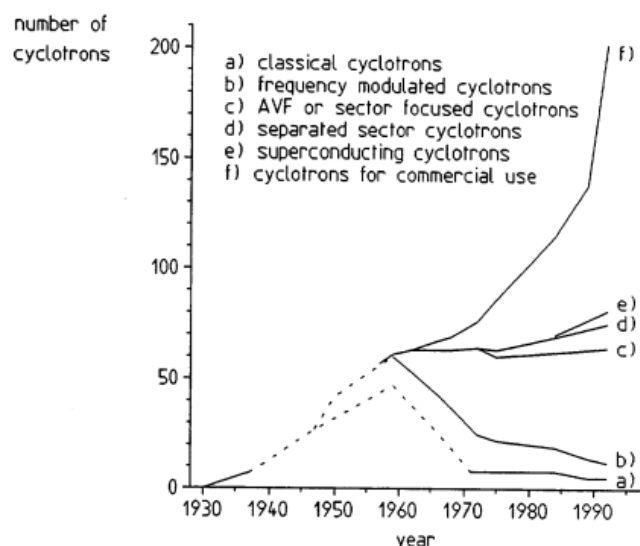


Рисунок 2 – Развитие циклотронов различных типов, начиная с первого, построенного в 1930г.

1.3. Принцип работы циклотронов

В циклотроне используется метод циклического ускорения тяжелых ионов. Тяжелые заряженные частицы попадают в вакуумную камеру из инжектора. Камера расположена между полюсами электромагнита, а внутри нее расположены электроды, так называемые дуанты, формирующие ускоряющие зазоры. К дуантам приложено переменное электрическое поле. Электромагнит создаёт однородное магнитное поле перпендикулярно плоскости дуантов. Инжектированный в центр циклотрона пучок ионов захватывается в ускорение электрическим полем дуантов, а с помощью магнитного поля траектория пучка имеет вид раскручивающейся спирали. Таким образом частица входит в первый дуант и описывает дугу, радиус которой пропорционален скорости частицы. При выходе из первого дуанта частица вновь ускоряется т.к. изменяется полярность напряжения, и переходит во второй дуант. В нем она описывает дугу большего радиуса. Далее ускорение происходит аналогичным способом, траектория частицы показана на рисунке 3. Для нормальной работы ускорителя необходимо выполнить условие резонансного ускорения: высокочастотное напряжение, прикладываемое к дуантам, должно быть равно частоте обращения ионов. Это

необходимо для того, чтобы частицы находились в фазе с напряжением и поэтому всегда ускорялись при попадании в область действия электрического поля. Радиус круговой орбиты пропорционален импульсу частицы. Когда радиус орбиты и энергия частицы достигают максимума допустимых значений, пучок частиц выводится из циклотрона [5].

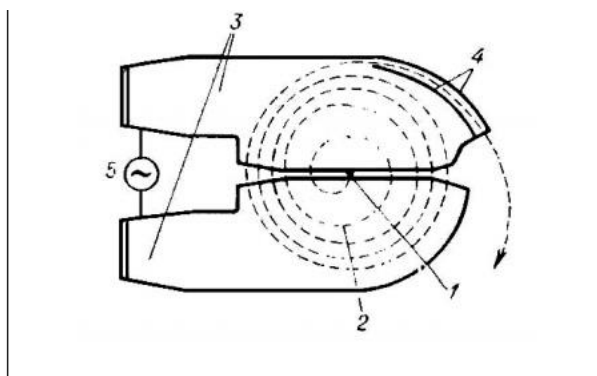


Рисунок 3 – Принципиальная схема циклотрона: 1-ионный источник, 2-траектория ускорения частицы, 3-дуанты, 4-выведенный пучок, 5-переменное электрическое поле.

1.3.1. Компоненты циклотрона

В состав ускорительного комплекса входят:

- магнитная система,
- высокочастотная резонансная система и ВЧ генератор,
- вакуумная камера и система высоковакуумной откачки,
- ионный источник и система инжекции пучка,
- система диагностики и коррекции пучка,
- элементы вывода пучка,
- два канала транспортировки пучка ускоренных ионов,
- камеры для физических экспериментов
- система водоохлаждения,

- система контроля и управления, электропитания.

Ионный источник

Неотъемлемой частью циклотрона является ионный источник, устройство для получения ионного пучка в вакууме. В данный момент существует множество разных ионных источников. Их можно классифицировать по: принципу действия, по назначению, по использованному рабочему веществу и по заряду производимых в источнике ионов. В циклотронах применяют источники двух типов: внутренние и внешние [4-7].

Внутренний источник располагается в центре циклотрона. Он применяется для создания пучков протонов (средний ток - до 10 мА, импульсный ток - до 100 мА) и легких ионов (до неона). К таким источникам относят источники с холодным катодом.

В источниках внешнего типа получается создать высоко зарядные ионы, их транспортируют в центр циклотрона, где происходит захват и ускорение. К таким источникам относятся ЭЦР источники.

Для циклотрона У400М в ЛЯР ОИЯИ был разработан и создан ЭЦР источник DECRIS-2 с частотой СВЧ нагрева 14,3 ГГц. Общий вид источника показан на рисунке 4.

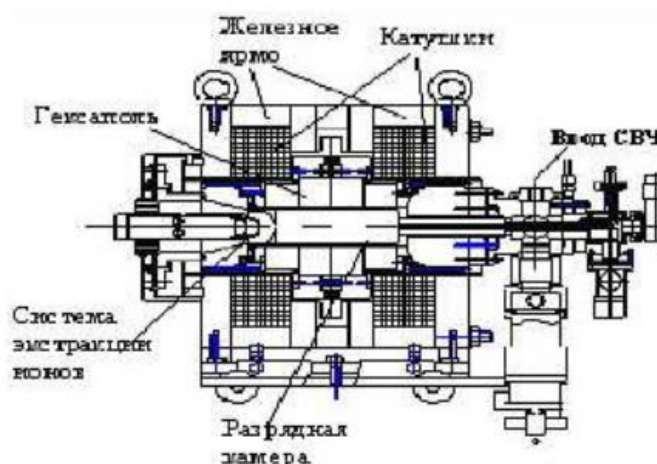


Рисунок 4 – Схема ЭЦР источника ионов DECRIS-2

Система аксиальной инжекции пучка

К системе транспортировки применяется основное правило, которое соответствует минимальной расходимости пучка (эмиттанс) по отношению к области (аксептанс), доступной для движения частиц. Расходимость зависит исключительно от типа источника ионов.

В системе аксиальной инжекции для фокусировки пучка используют основные типы фокусирующих элементов, такие как электростатические и квадрупольные линзы и соленоиды.

Для создания условия фокусно-параллельного переноса пучков, на входе каждого анализирующего магнита при инжекции в центр циклотрона используются фокусирующий соленоид (см. Рисунок 5).

Соленоиды состоят из следующих частей: обмотки возбуждения, магнитопровода (магнитного экрана), токоподвода, водоподвода и подставки с механическим контролем положения внешнего соленоида.

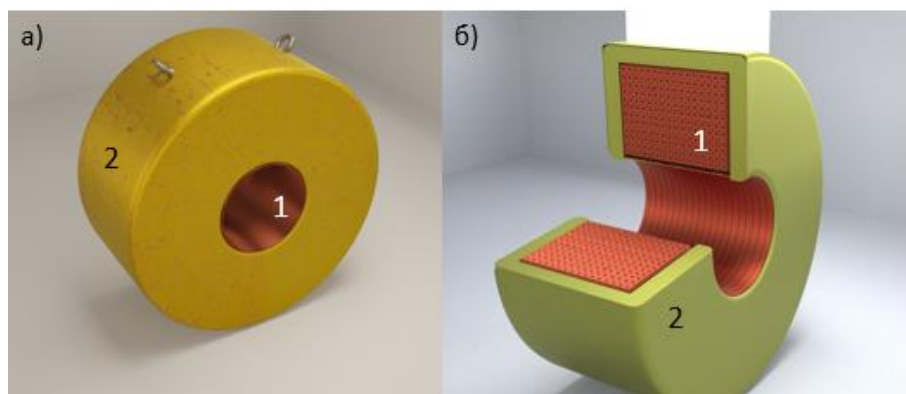


Рисунок 5 – 3D модель соленоида (а) и его сечения (б). 1 – обмотка возбуждения; 2 – магнитный экран

Магнитный экран состоит из двух боковых крышек и цилиндрического каркаса. Внутренний каркас соленоида представляет собой часть ионопроводящей трубы из немагнитной нержавеющей стали.

Обмотка возбуждения соленоида питается от источника постоянного тока и состоит из восьми секторов, намотанных медным проводом, соединенных последовательно. Обмотка возбуждения выполнена из медного

проводника квадратного сечения с каналом для прохождения охлаждающей воды.

Токоподвод представляет собой блок клеммных зажимов, на котором осуществляется соединение токоведущих кабелей с выводными концами обмотки соленоида.

Выбирая фокусирующие элементы, нужно учитывать рассеянное поле в аксиальном канале магнита, которое оказывает фокусирующее действие на пучок [8].

В системе аксиальной инжекции должны быть предусмотрены корректирующие магниты для коррекции отклонений пучка от оси, вызванных влиянием рассеянного поля магнита циклотрона и другими причинами.

Для пропуска ионов по зарядам применяют анализирующий магнит, который выполняет функцию анализа и выделения частиц нужной зарядности для дальнейшего ускорения. В ходе пропускания частиц через магнит происходит поворот пучка в канал аксиальной инжекции для поворота в вертикальную плоскость [9].

Для группирования пучка используется банчер. Банчер - это устройство, осуществляющее разбиение непрерывного пучка заряженных частиц на отдельные сгустки или усиливающее степень группирования в пучке (сжимающее сгустки). Банчер располагается в канале аксиальной инжекции на траектории пучка и создает ВЧ электрическое поле, которое в зависимости от фазы ускоряющего ВЧ поля циклотрона замедляет или ускоряет частицы так, чтобы на выходе банчера они собрались в компактные сгустки по фазе совпадающие с периодом ускорения пучка в дуантах.

Ионно-оптическая система обеспечивает транспортировку пучков с минимальными потерями и согласование параметров инжектируемых пучков с аксептансом инфлектора.

Инфлектор осуществляет поворот инжектируемого пучка из аксиального канала в медианную плоскость циклотрона.

Существуют три основных вида инфлекторов:

1. Электростатическое зеркало.

Электростатическое зеркало состоит из верхнего электрода в виде сетки, находящейся под нулевым потенциалом, и нижнего электрода, находящегося под положительным потенциалом, равным напряжению инжекции. Если сравнить электростатическое зеркало с другими типами инфлекторов, то следует отметить:

- простота конструкции;
- большой аксептанс;
- универсальность в отношении ускоряющих частиц;

Среди отрицательных свойств:

- Сетка инфлектора подвергается разрушительному воздействию пучка и требует периодической замены;
- В зависимости от плотности сетки уменьшается интенсивность пучка.
- должно быть очень высокое напряжение (приблизительно равно напряжению инжекции), т.е. в 2-3 раза выше, чем у других типов инфлекторов, что ведет к техническим затруднениям.

2. Инфлектор гиперболический.

Электроды инфлектора представляют собой две концентрические плоскости, образованные вращением гипербол вокруг оси Z параллельной вектору магнитного поля.

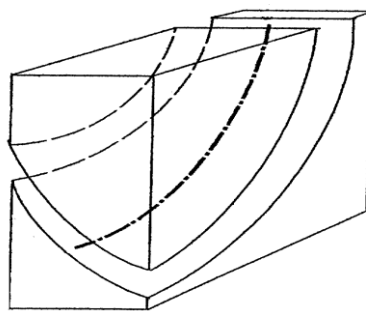


Рисунок 6 – Гиперболический инфлектор

К положительным свойствам инфлектора можно отнести хорошие оптические свойства и сравнительно большой аксептанс пучка, который позволяет использовать его в системах транспортировки от любого источника ионов.

К недостаткам инфлектора можно отнести относительно большие размеры, проблемы геометрии, рассчитанные на одну частицу определенной энергии и создание сильной 1-ой гармоники магнитного поля в центре ускорителя при совмещении оси инжекции с осью пучка

3. Спиральный инфлектор.

В спиральном инфлекторе электрическое поле в каждой точке траектории направлено перпендикулярно скорости частицы. Такой тип инфлектора аналогичен цилиндрическому дефлектору, но учитывает действие магнитного поля, которое на входе направлено параллельно скорости частицы, а на выходе перпендикулярно.

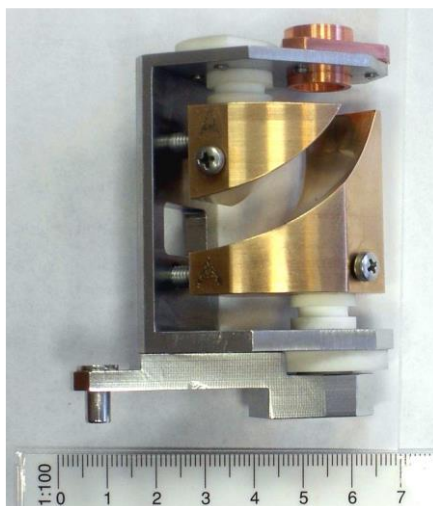


Рисунок 7 – Спиральный инфлектор.

Среди положительных свойств спирального инфлектора нужно выделить компактность, низкое напряжение на электродах и хорошие оптические свойства системы.

К недостаткам можно отнести сложную технологию изготовления инфлектора и малый аксептанс системы транспортировки.

Магнитная система циклотрона

Состоит из ярма, элементов рабочей области, обмотки возбуждения, азимутальных, радиальных и корректирующих катушек.

Магнит – одна из самых больших и тяжелых частей циклотрона. Поэтому его часто делают из сборных конструкций. Кроме того, это позволяет обеспечивать регулировку параллельности и соосности полюсных наконечников. Магниты ускорителей бывают нескольких типов.

- 1) Магниты Ш-образной формы:



Рисунок 8 – Циклотрон У-400. Лаборатория ядерных реакций им Г.Н. Флерова, ОИЯИ

Состоят из нижней и верхней горизонтальных балок и двух вертикальных стоек. На балках закреплены нижний и верхний цилиндрические полюса (рисунок 8) [9,10].

2) Магниты броневое типа:



(а)



(б)

Рисунок 9 – Изохорный циклотрон для протонной терапии с магнитом броневое типа, Бельгия. (а). Циклотрон СС МСС 30/15 (б)

Рабочая область в таком магните располагается внутри ярма броневое типа.

3) Магниты с разделенными секторами:

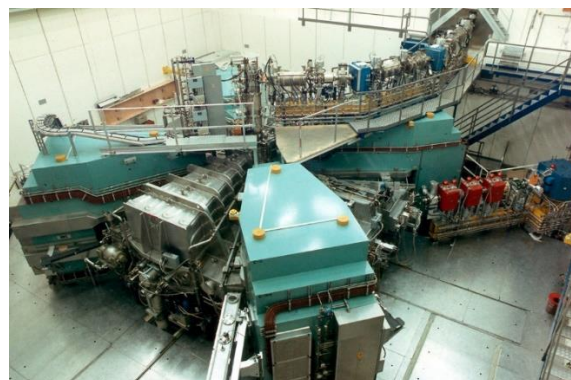


Рисунок 10 – Магниты с разделенными секторами в институте имени Пауля Шеррера в Швейцарии.

Магнитная система состоит из отдельно стоящих магнитов. Такие магниты разделяются на два типа: радиально-секторные и спирально-секторные.

Формирование магнитного поля циклотрона

Что бы обеспечить требуемое распределение магнитного поля в рабочей области, необходимо использовать шиммы. Шимм – специальная деталь, изготовленная из магнитного материала. Их располагают так, чтобы своим влиянием совместно с основным магнитом достичь необходимую конфигурацию магнитного поля [11].

1. Обмотки возбуждения

Для создания магнитного поля используются обмотки возбуждения. Они бывают двух типов, “теплого” и сверхпроводящего.

2. Корректирующие катушки

Корректирующие катушки используются для оперативной коррекции магнитного поля циклотрона и разделяться на два типа: радиальные и азимутальные.

Азимутальные корректирующие катушки компенсируют нежелательные гармоники в азимутальном распределении поля и регулируют величину флаттера.

Радиальные корректирующие катушки изменяют и регулируют среднее магнитное поле циклотрона с целью сохранения изохронности движения частиц

Система вывода пучка

Система вывода необходима для отклонения пучка и смещения движения частиц в ходе ускорения для поворота на канал вывода ускорителя. При этом возникает необходимость в ходе отклонения частиц из циклотрона обеспечить оптимальный вывод пучка, при котором были бы возможны минимальные потери частиц. На сегодняшний день применяются два основных способа вывода пучка циклотрона, а именно вывод пучка методом перезарядки ионов на тонкой фольге, и метод с использованием электростатического дефлектора. На циклотроне У400М используют метод перезарядки ионов на тонкой фольге [12, 13].

Вывод пучка ионов из циклотрона при использовании перезарядной фольги был предложен в 1964 году Флеровым Г.Н. и Оганесяном Ю.Ц. Основной проблемой данного способа вывода является время жизни фольги. Основным критерием при изготовлении фольги является получение высокой плотности напыления без примеси побочных веществ. Наилучшим образом в работе продемонстрировали себя углеродные фольги толщиной до 100 мкг/см².

Элементы диагностики пучка

пробник вывода, расположенный между дефлектором и магнитным каналом и позволяющий оптимизировать положение дефлектора и магнитного канала;

профиломер и люминофор, расположенные в выводном патрубке на выходе из вакуумной камеры и позволяющие определять форму и интенсивность выведенного пучка.



Рисунок 11 – Выводной патрубок с профилометром и люминофором.

Высокочастотная ускоряющая система

Ускорение частиц в циклотроне проходит при помощи высокочастотного электрического поля, создаваемого на электрических электродах- дуантах. В ЛЯР на циклотронах, ускоряющая система состоит из следующих составляющих:

1) Четыре расположенных диаметрально противоположно четвертьволновых коаксиальных резонатора – стальные баки, плакированные внутри бескислородной медью, и медные штоки, переходящие в дуанты.



Рисунок 12 – Изображение дуанта

2) Закорачивающая медная пластина с прижимными шарообразными контактами, используемая для изменения частоты резонаторов.

- 3) Петля связи, передающая высокочастотную энергию от генератора в резонансную систему.
- 3) Триммеры точной подстройки резонансной частоты.
- 4) Пикап электроды и измерительные петли для измерения напряжения на дуантах.



Рисунок 13 – Фотография ВЧ ускорительной системы циклотрона

Высокочастотная система необходима для питания дуантов (ускоряющий электрод) соответствующим напряжением. С ее помощью частица получает необходимую энергию для ускорения. ВЧ система состоит из трех основных частей: дуанты, резонатор, генератор и связывающая их линия.

1.4. Базовые уравнения и формулы

Уравнение движения частицы с массой m и зарядом q , движущейся со скоростью $\vec{v} = v_x, v_y, v_z$ в магнитном поле с индукцией $\vec{B} = B_x, B_y, B_z$ определяется силой Лоренца $\vec{F}_L$ и законом Ньютона

$$\vec{F}_L = q[\vec{v} \times \vec{B}] \quad (1)$$

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \vec{F}_L \quad (2)$$

откуда

$$\frac{d(mv_x)}{dt} = \frac{d(m\dot{x})}{dt} = q[yB_z - zB_y] \quad (3)$$

$$\frac{d(mv_y)}{dt} = \frac{d(m\dot{y})}{dt} = q[zB_x - xB_z] \quad (4)$$

$$\frac{d(mv_z)}{dt} = \frac{d(m\dot{z})}{dt} = q[xB_z - yB_x] \quad (5)$$

Используем цилиндрические координаты, которые не зафиксированы в пространстве

$$\frac{d(m\dot{r})}{dt} - mr\dot{\theta}^2 = q[r\theta\dot{B}_z - z\dot{B}_\theta] \quad (6)$$

$$\frac{d(mr\dot{\theta})}{dt} + m\dot{r}\dot{\theta} = q[r\theta B_z - z\dot{B}_\theta] \quad (7)$$

$$\frac{d(m\dot{z})}{dt} = q[\dot{r}B_\theta - r\dot{\theta}B_r] \quad (8)$$

Сначала рассмотрим нерелятивистскую частицу с $m = m_0$ в однородном продольном магнитном поле. Для удобства индукция B_0 взята в направлении, противоположном оси z , т.е. $B_z = -B_0$, что дает движение по часовой стрелке [1, 14]. Тогда уравнения сокращаются до

$$m_0\ddot{x} = -q\dot{y}B_0 \quad (9)$$

$$m_0\ddot{y} = q\dot{x}B_0 \quad (10)$$

$$m_0\ddot{z} = 0 \quad (11)$$

или

$$m_0(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2) = -q\dot{\theta}B_0 \quad (12)$$

$$m_0(r\ddot{\theta} - 2\dot{r}\dot{\theta}) = q\dot{r}B_0 \quad (13)$$

$$m_0\ddot{z} = 0 \quad (14)$$

Результат – это замкнутая круговая траектория в плоскости ХУ, перпендикулярной линиям продольного поля. Радиус орбиты и угловая скорость вращающейся частицы

$$R = \frac{p}{(qB_0)} \text{ или } p = qRB_0 \quad (15)$$

$$\omega = \frac{p}{(qB_0)} \quad (16)$$

Для того, чтобы получить численные значения, удобно выразить m через массовое число A , q через зарядовое состояние Z , т.е.

$$m_0c^2 = AE_{aem} \quad (17)$$

$$q = Ze \quad (18)$$

где e это заряд электрона, а E_{aem} это эквивалентная энергия одной атомной единицы, определенной как $\frac{1}{12}$ массы ^{12}C . $E_{aem} = 931.494$ МэВ, масса протона $A=1.007276$ а.е.м. Так, мы получаем точное численное значение для частоты обращения f

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = C_1(Z/A)B_0 \quad (19)$$

при $C_1 = \frac{ec^2}{2\pi E_{aem}} = 15.356122$ МГц/Тл

Для многократного ускорения необходим резонанс между частотой обращения и ускоряющим ВЧ напряжением. Пример резонансной кривой, т.е. диапазона B , в котором происходит ускорение, дан на рис. 2

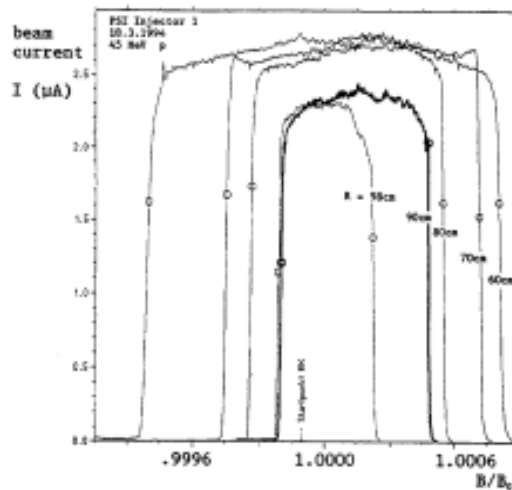


Рисунок 14 – Резонансная кривая инжектора.

Ширина резонанса - это мера числа оборотов. Она может быть использована для определения пика прироста энергии за оборот. Край резонансной кривой — это мера фазовой ширины сгустка пучка. Информация, содержащаяся в резонансной кривой, также может быть использована для определения фазовой истории частицы, т.е. ее фазы как функции от радиуса [1].

Релятивистский случай

Основное циклотронное уравнение $p = qRB$ описывает связь между индукцией магнитного поля B и движением частицы (моментом p , радиусом кривизны R) за все время процесса ускорения. Это верно даже при релятивистских скоростях частиц до тех пор, пока учитывается релятивистский прирост массы [15].

Переписывая уравнение через релятивистские параметры β, γ , мы получаем

$$m = m_0 \gamma \quad (20)$$

$$p = m_0 \gamma v = qRB \quad (21)$$

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{qB}{m_0 \gamma} \quad (22)$$

где β, γ определены через скорость частиц v , скорость света c и полную энергию E_{tot} (сумма энергии покоя $m_0 c^2$ и кинетической энергии), т.е.

$$\beta = \frac{v}{c} \quad (23)$$

$$\gamma = \frac{E_{tot}}{m_0 c^2} \quad (24)$$

$$\gamma^2 = \frac{1}{1-\beta^2} \quad (25)$$

Мы видим, что угловая скорость может быть только константой, если сила соответствует релятивистскому увеличению массы во время ускорения. Следовательно, индукция B должна быть следующей функцией радиуса $B(r) = B_0 \gamma(r)$. Принимая центрированную круговую орбиту $r=R$ и используя $\gamma^2 = 1 + \beta(r)^2 / (1 - \beta(r)^2)$, мы можем записать B через β и вычислить $B(r)$ из соответствующих параметров циклотрона ω , $f_{RF} = h\omega/2\pi$ и B_0

$$B(r) = B_0 \sqrt{1 + \frac{\beta^2}{1-\beta^2}} \quad (26)$$

где

$$\beta(r) = \frac{\omega}{c} r \quad (27)$$

$$C_3 = \frac{\varepsilon c}{E_{aem}} = 0.32184 \text{ Тл}^{-1} \text{ м}^{-1} \quad (28)$$

$$\frac{\omega}{c} = C_2 \left(\frac{f_{RF}}{h} \right), \quad C_2 = \frac{2\pi}{c} = 0.02096 \text{ МГц}^{-1} \text{ м}^{-1}$$

Так как релятивистская поправка зависит от (Z/A) , форма данного поля $B(r)$ подходит только для одного типа частиц. Катушки коррекции необходимо настраивать под разные частицы и различные энергии

В изохронном циклотроне радиус орбиты пропорционален β . Это может быть записано через R_∞ при $\beta=1$.

$$R = R_\infty \beta = \frac{\beta(r)c}{\omega} = \frac{\beta(r)}{C_3(Z/A)B_0} \quad (29)$$

R_∞ – это удобный параметр для масштабирования соотношений. Типичные значения для протонов в поле $B_0 = 1T$ в центре магнита $R_\infty = 3.130$ м, и $R_\infty = 1.70$ мм для электронов при $B_0 = 1T$. Нужно отметить, что $B = B_0\gamma$ становится бесконечной при $r = R_\infty$.

Магнитное поле, которое возрастает с увеличением радиуса, имеет эффект дефокусировки пучка в вертикальном направлении. Фокусировка может быть обеспечена либо применением радиально спадающих магнитных полей, либо использованием азимутальной вариации поля. Эта трудность повлияла на историю развития циклотронов. Первые классические изохронные циклотроны имели радиально-спадающие поля и были, следовательно, ограничены до нерелятивистских энергий. Чтобы достичь более высоких энергий, были созданы синхроциклотроны. Синхротроны также имели радиально-спадающие поля, но частота ВЧ системы менялась во время цикла ускорения, дабы компенсировать рост релятивистской массы. В результате пучок стал пульсирующим, и как следствие, с ограниченной интенсивностью. В конце концов, это ограничение преодолели введением азимутально-меняющихся полей с целью гарантирования фокусировки даже в случае радиально-возрастающих полей [1,14].

В самом общем случае магнитное поле циклотрона не гомогенно, а является функцией радиуса r и азимута θ .

2. Практическая часть

2.1. Изохронный циклотрон У-400М

Циклотрон У-400М (рисунок 15) был создан для исследования структуры ядер и механизмов ядерных реакций и начал свою работу в мае 1991 года. Его постройка позволила решать фундаментальные и прикладные задачи ядерной физики:

- 1) Синтез сверхтяжелых элементов
- 2) Изучение химических свойств сверхтяжелых элементов
- 3) Изучение структуры легких ядер на границе нуклонной стабильности
- 4) Изучение резонансной структуры ядерных систем за границей нейтронной стабильности
- 5) Изучение механизмов слияния и деления ядер



Рисунок 15 – Циклотрон У-400М, ОИЯИ, Лаборатория Ядерных Реакций

2.2. Назначение и область применения

Изохронный циклотрон У-400М изначально предназначен для ускорения ионных пучков с отношением массы к заряду A/Z от 2 до 5, ускоряемых до энергий 50-80 МэВ/нуклон. В 2008 году возможности циклотрона значительно расширились за счет добавления ионных пучков с A/Z от 6 до 10, ускоряемых до энергий 5 - 11 МэВ/нуклон. При добавлении

таких ионных пучков стали возможны эксперименты по синтезу новых сверхтяжелых элементов и расширена область прикладных исследований [6].

На рисунке 16 представлена рабочая диаграмма, определяющая режимы ускорения циклотрона У-400М. По горизонтальной оси отложено среднее магнитное поле в центре циклотрона, по вертикальным осям - энергия пучка на радиусе вывода $R=1.76$ м (слева) и частота обращения ионов (справа). Ускорение ионов происходит на 2 - 5 гармониках ВЧ напряжения, при этом ВЧ генератор обеспечивает диапазон частот 11.5-24.0 МГц [16].

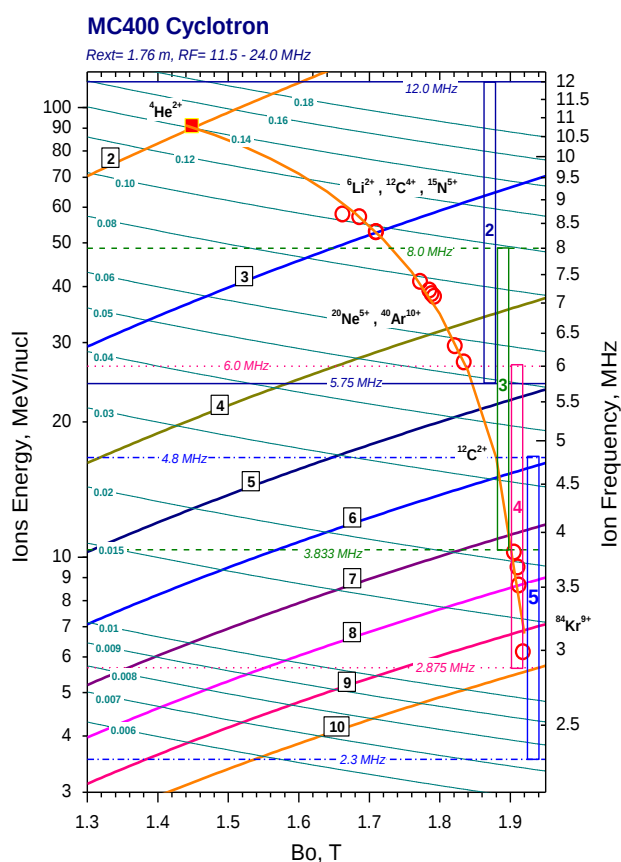


Рисунок 16 – Рабочая диаграмма циклотрона У-400М

На графике линиями с цифрами 2-10 представлены возможные режимы ускорения для ионов с соответствующим соотношением массы к заряду A/Z . Эти линии связывают уровень магнитного поля в центре циклотрона, энергию ускорения пучков и частоту обращения рассматриваемого иона. Линии, обозначенные как 0.006 – 0.018 показывают

величину роста изохронного магнитного поля от центра циклотрона до радиуса вывода для соответствующих режимов ускорения. Размерность – Тл. На графике кружками обозначены экспериментально полученные режимы ускорения [1,14-17].

2.3. Построение компьютерной модели магнита

Для проведения расчетов магнитного поля была построена трехмерная компьютерная модель магнитопровода изохронного циклотрона У-400М в соответствии с чертежами из библиотеки ЛЯР. Построение модели магнитопровода осуществлялось в несколько этапов. За основу были взяты чертежи элементов магнитопровода циклотрона, переведенные в электронный вид в программе ACAD. При помощи программы 3D CAD INVENTOR двумерные элементы магнитопровода были преобразованы в трехмерные. Полученные трехмерные элементы были импортированы в программу расчета магнитного поля TOSCA, где были собраны в компьютерную модель электромагнита У-400М. Обмотка возбуждения была добавлена в модель непосредственно в программе TOSCA.

Трехмерная компьютерная модель создана на базе чертежей:

- 1) А.1859 – магнит циклотрона.
- 2) 2557 – реконструкция внешней инжекции.

В силу отсутствия исходных данных в модели не было учтено:

- 3) Тонкое шиммирование за счет профилирования секторного шимма - «сабли».
- 4) Фаска носика сектора.
- 5) Реальная (измеренная после сборки магнита) высота носика сектора. Использована расчетная (по чертежу) 116 мм вместо измеренной 115.66 мм.

Ниже описаны основные характеристики магнитопровода, его элементов и показаны созданные элементы компьютерной модели магнитопровода по отдельности.

Магнитопровод изохронного циклотрона У-400М имеет «Ш»-образную форму и состоит из ярма, полюсов, секторов, элементов центральной области и элементов дополнительной коррекции. Параметры обмотки возбуждения электромагнита взяты как в исходном, так и в новом вариантах исполнения.

Основные параметры электромагнита циклотрона У400М представлены в таблице 1. Форма электромагнита в виде сечений в вертикальной и горизонтальной плоскостях представлена на рисунке 17 [1,4,7].

Таблица 1 – Основные параметры магнита циклотрона У-400М

Размер магнита, мм	11000×4200×7460
Диаметр полюса, мм	4000
Среднее магнитное поле, Тл	1.5-1.92
Масса магнита, т	2300
Мощность, кВт	624
Зазор между полюсами, мм	500
Зазор между секторами, мм	100
Количество секторов на полюсе	4
Высота сектора, мм	115.66-200
Спиральность сектора	42°

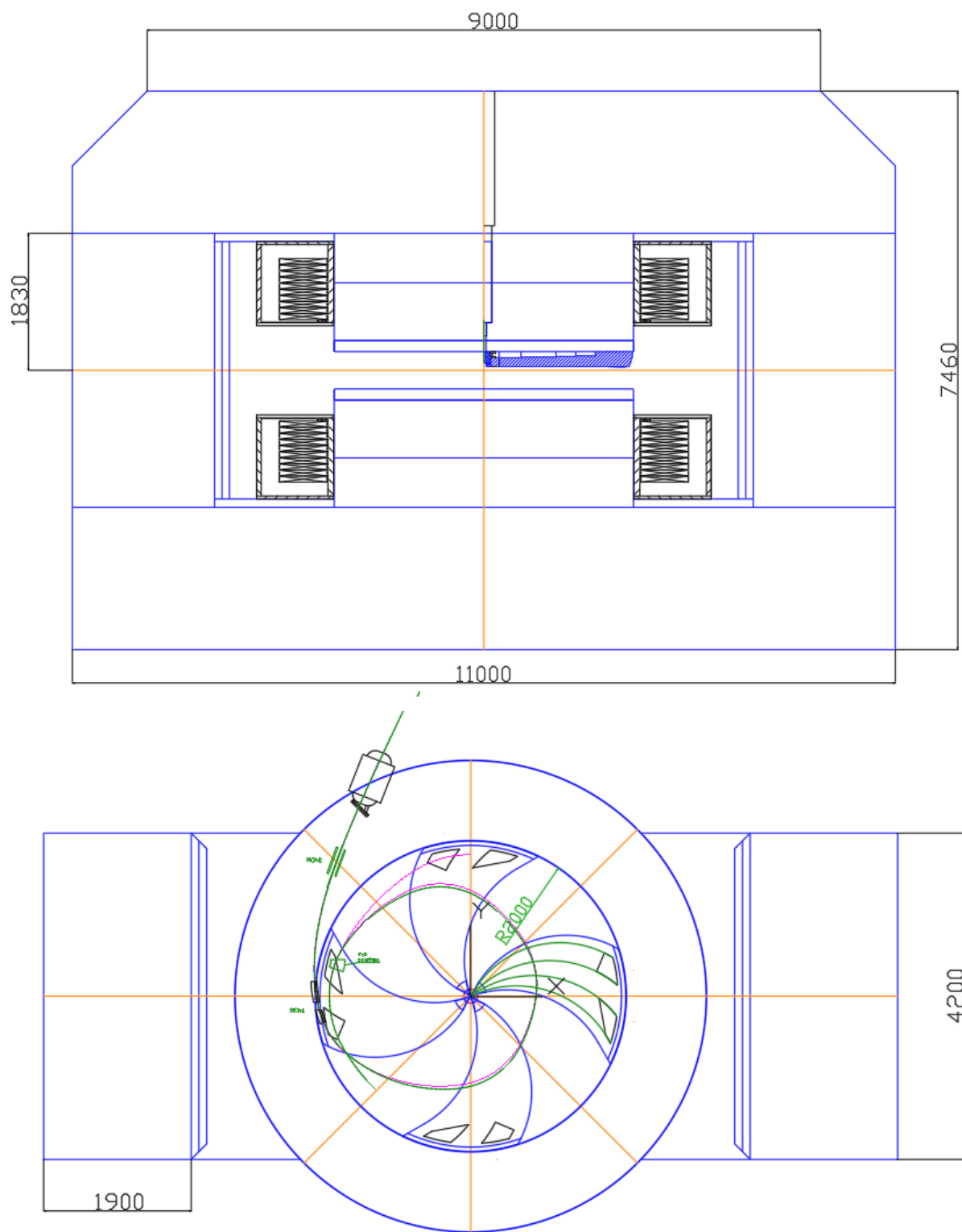


Рисунок 17 – Вид и основные размеры магнита циклотрона У-400М

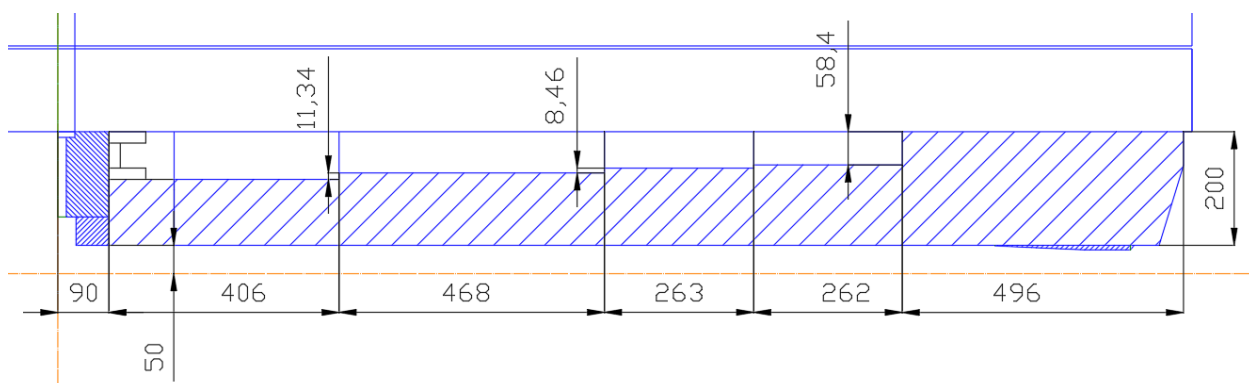


Рисунок 18 – Сечение сектора циклотрона У-400М



Рисунок 19 – Основные элементы магнитопровода: 1-полюс магнита, 2- сектора магнита, 3- ярмо магнита

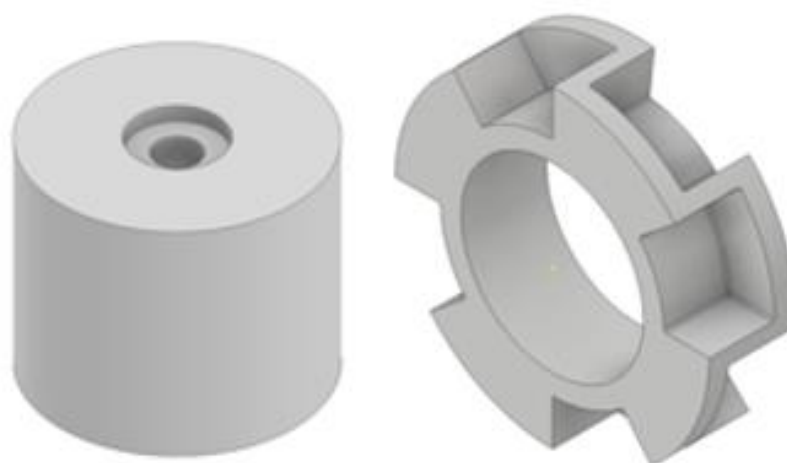


Рисунок 20 – Основные элементы рабочей области магнитной системы циклотрона: 1- пробка, 2- роза

На рисунке 21 представлена компьютерная модель электромагнита У400М в собранном виде. В силу вертикальной симметрии магнитопровода в расчетах используется верхняя половина магнита. Незначительные отличия в симметрии, такие как аксиальный канал в верхней балке и отсутствие фасок на нижней балке не оказывают существенного влияния на точность расчетов.

Азимутальная вариация магнитного поля изохорного циклотрона У-400М создаётся четырьмя секторами угловой протяженностью 45° . Угол спиральности секторов на конечном радиусе составляет 42° [1,4,18].

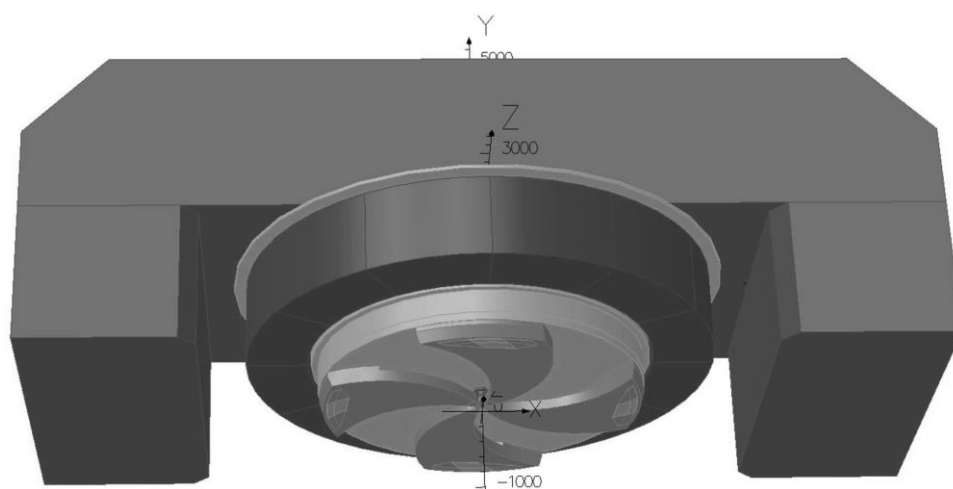


Рисунок 21 – Модель магнита в программе TOSCA 1/2 главный вид

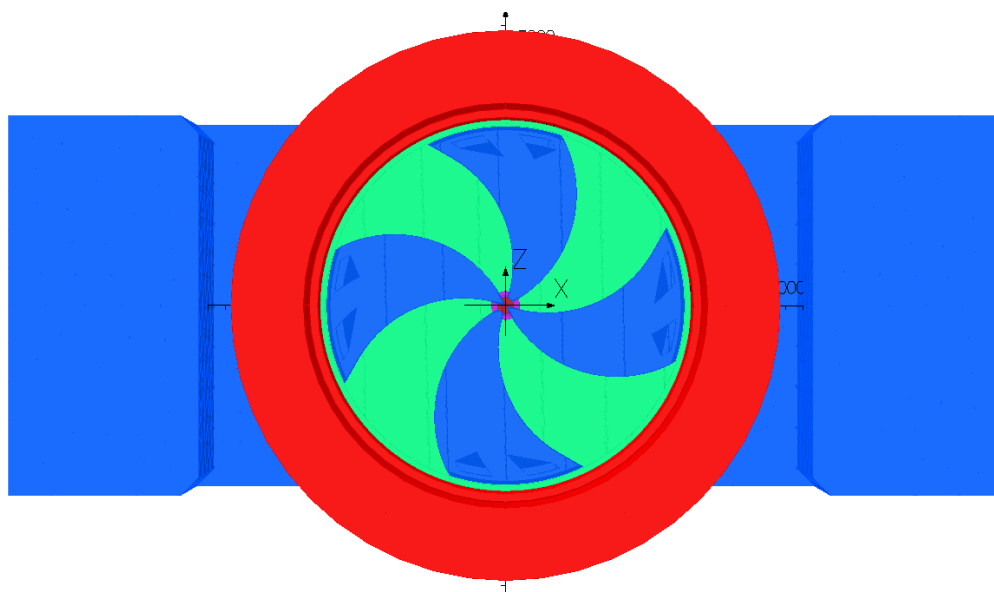


Рисунок 22 – Модель магнита в программе TOSCA 1/2, вид верхней половины магнита.

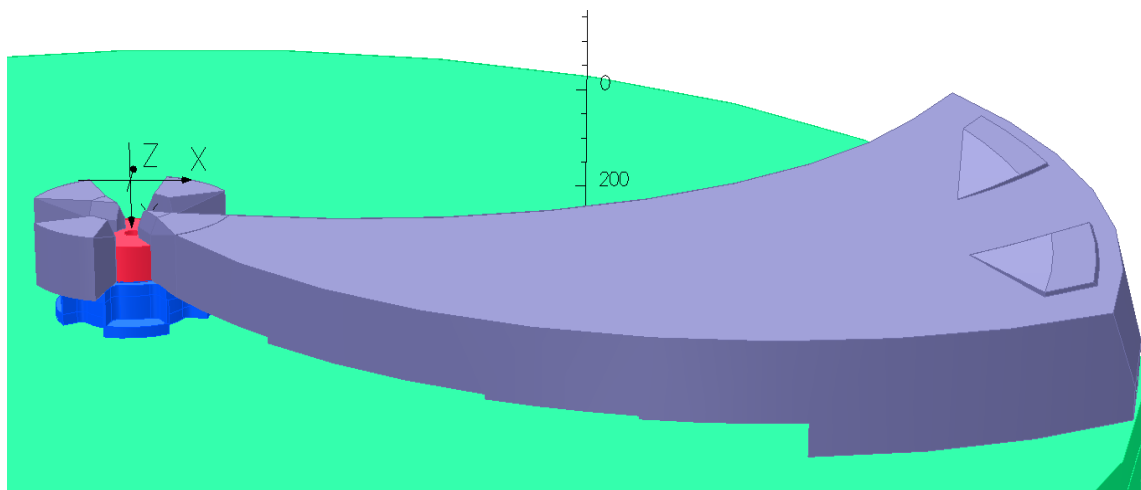


Рисунок 23 – Модель сектора и элементов центра магнита в программе TOSCA

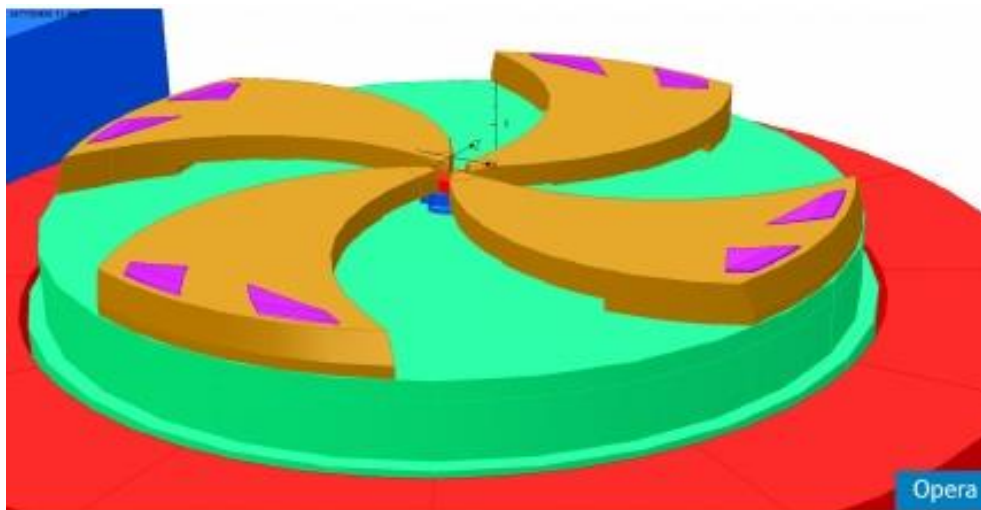


Рисунок 24 – Компьютерная модель секторов электромагнита циклотрона У400М

В модели магнита была учтена несимметрия центральной области циклотрона У400М, вызывающая появление второй гармоники магнитного поля (рисунок 25).

Обмотка электромагнита состоит из двух катушек, размещенных на верхнем и нижнем полюсах. В модели использованы параметры как старых так и новых катушек. Параметры новых катушек подбирались так что бы было возможным использовать имеющийся источник тока. Размещение новых катушек ближе к центру магнита, рисунок 26, позволит значительно

сэкономить на технологических и экономических параметрах производства [1-7,19].

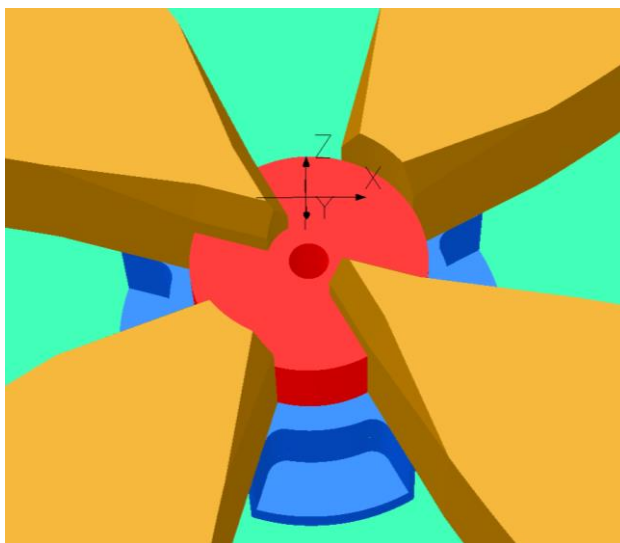


Рисунок 25 – Вид центральной области магнита. Несимметрия носиков секторов, вызывающая возникновение второй гармоники магнитного поля.

Таблица 2 – Параметры обмоток электромагнита циклотрона У-400М

Параметры	Новая катушка	Старая катушка
Сечение катушки, мм	633×816	755×1001
Количество секций в обмотке	2×10	2×9
Количество витков в обмотке	2×240	2×252
Размер проводника, мм	50×35 (d17)	46×46 (d27)
Материал проводника	Медь	Медь
Ток в обмотке, А	1800	1800
Ампер-витки	864000	907200
Мощность	600	624

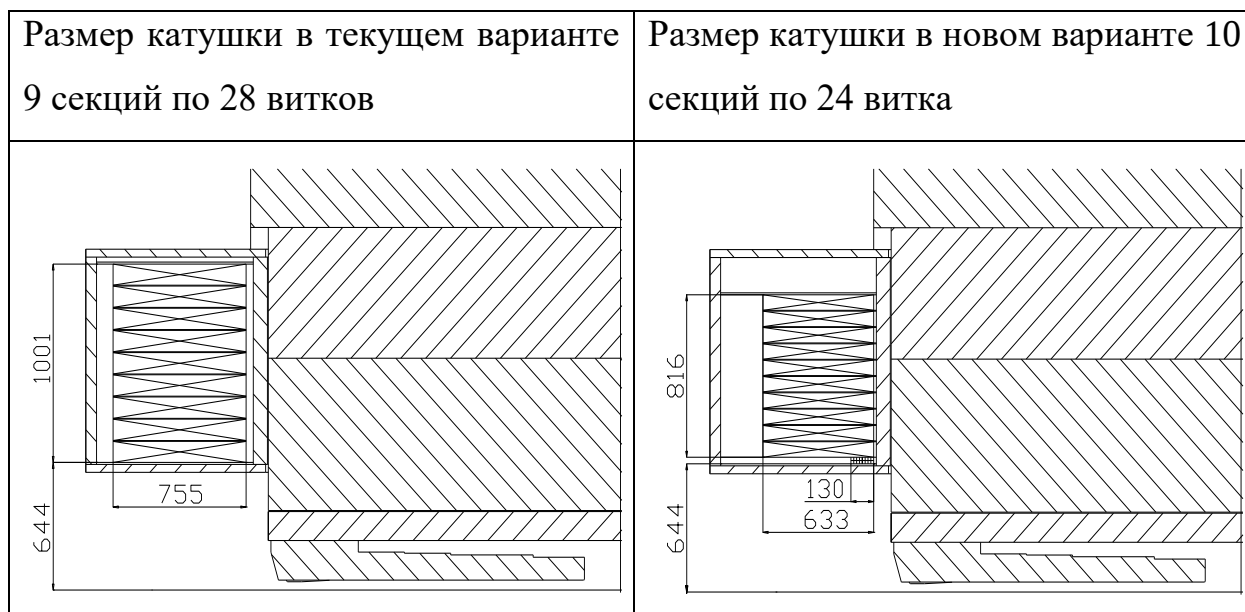


Рисунок 26 – Сечения катушек электромагнита циклотрона У400М

2.4. Магнитные свойства стали

Магнитные свойства стали, используемой при расчете поля магнита, показаны на рисунке 27. Ярмо магнита (стойки и балки) предположительно изготовлены из стали St03, в то время как полюса и элементы рабочего зазора из стали St10. Так как реальные свойства стали магнитопровода неизвестны, для расчетов использованы St03 – из базы данных программы TOSCA, St10 – измеренные свойства стали магнита циклотрона ДЦ72.

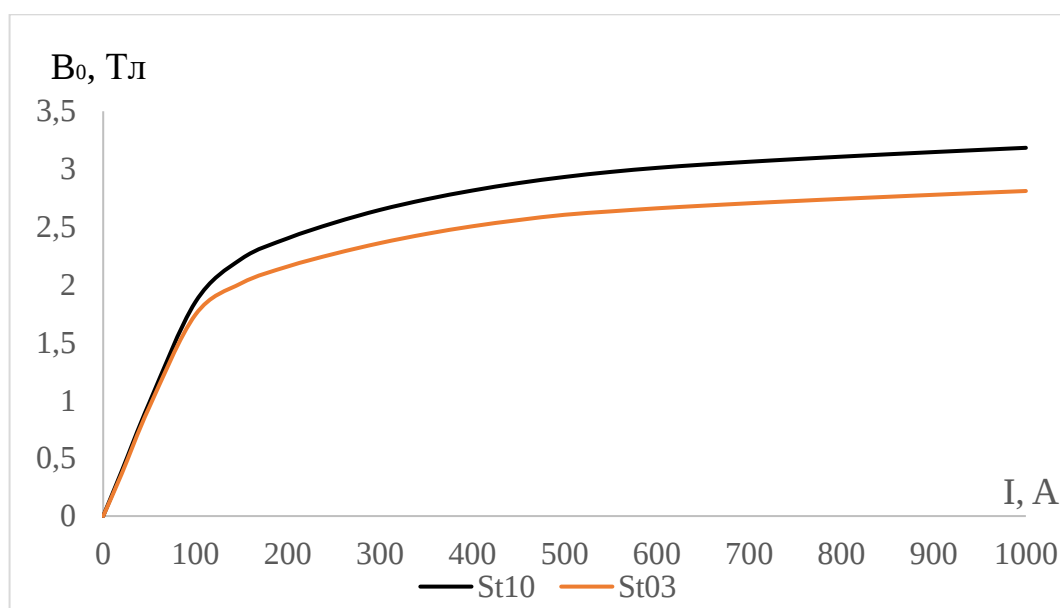


Рисунок 27 – Магнитные свойства стали Ст03 и Ст10, используемые в расчетах

2.5. Построение сетки

Для проведения расчетов необходимо построить поверхностную и объемную сетки. Тетраэдральная сетка позволяет заполнить элементы с любой геометрией, однако такая сетка является неупорядоченной, поэтому в распределении магнитного поля имеется сеточный шум. Данный недостаток устраняется применением упорядоченной сетки, но ее использование накладывает жесткие ограничения на граничные элементы. Таким образом, выбор формы и размеров элементарных ячеек сетки определяет скорость, а главное, точность выполняемых расчетов. Поэтому, плотность сетки увеличивается в области рабочего зазора электромагнита.

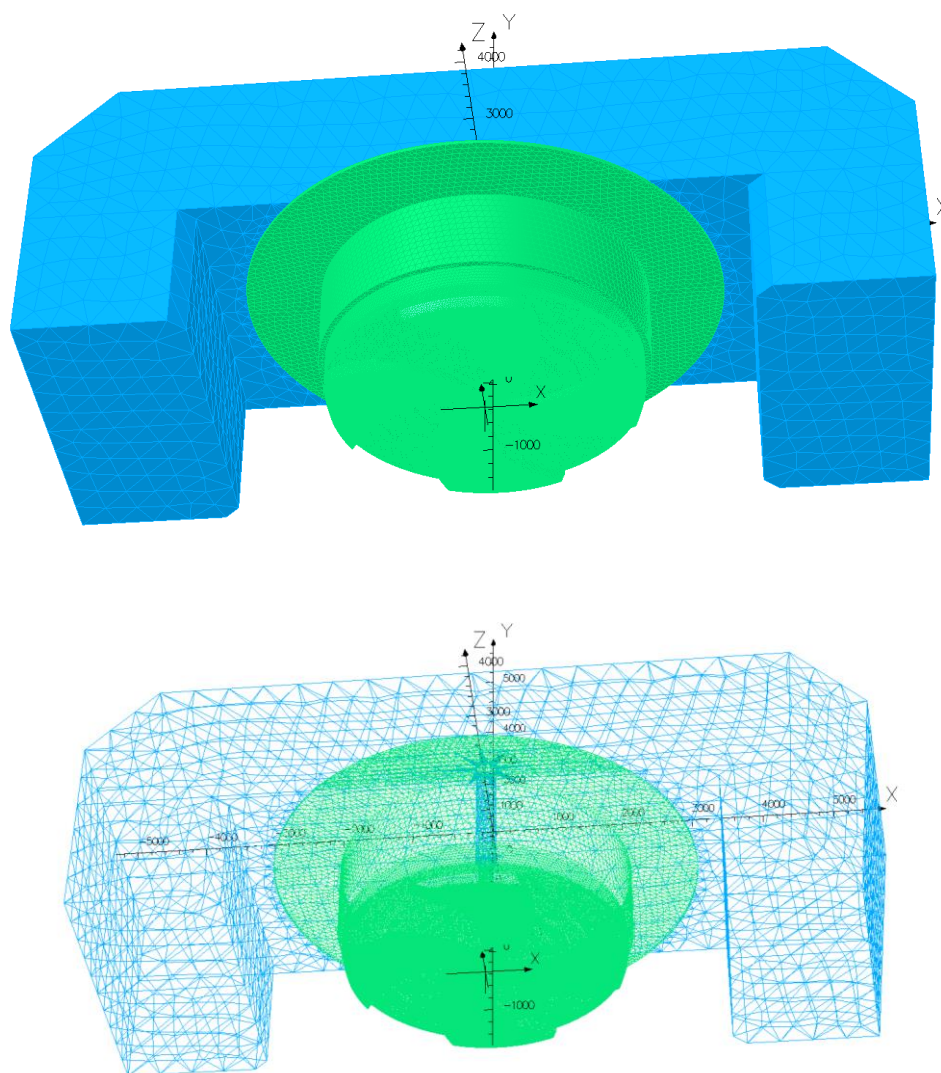


Рисунок 28 – ½ часть модели магнита с сеткой

2.6. Расчет магнитного поля циклотрона

Изохорная форма среднего магнитного поля создается изменением радиального профиля стальных элементов в рабочем зазоре электромагнита циклотрона У400М (элементов центра и секторов), а также системой токовых корректирующих катушек, располагаемых на секторах [14].

Результаты расчетов магнитного поля обрабатывались программой BCALC, позволяющей получить все основные характеристики магнитного поля циклотронов и представить их в наглядном виде (рисунок 29).

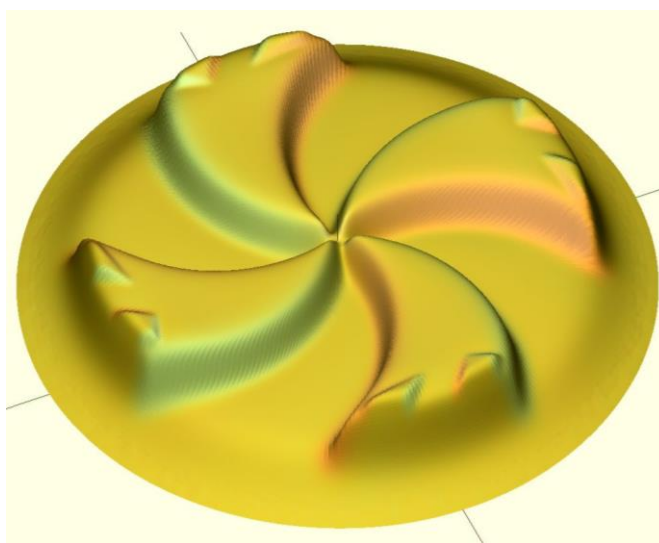


Рисунок 29 – Распределение базового магнитного поля в медианной плоскости для модели электромагнита циклотрона У-400М

Ниже представлен сравнительный график радиальной зависимости величины среднего магнитного поля электромагнита циклотрона У400М по результатам измерений и проведенных расчетов.

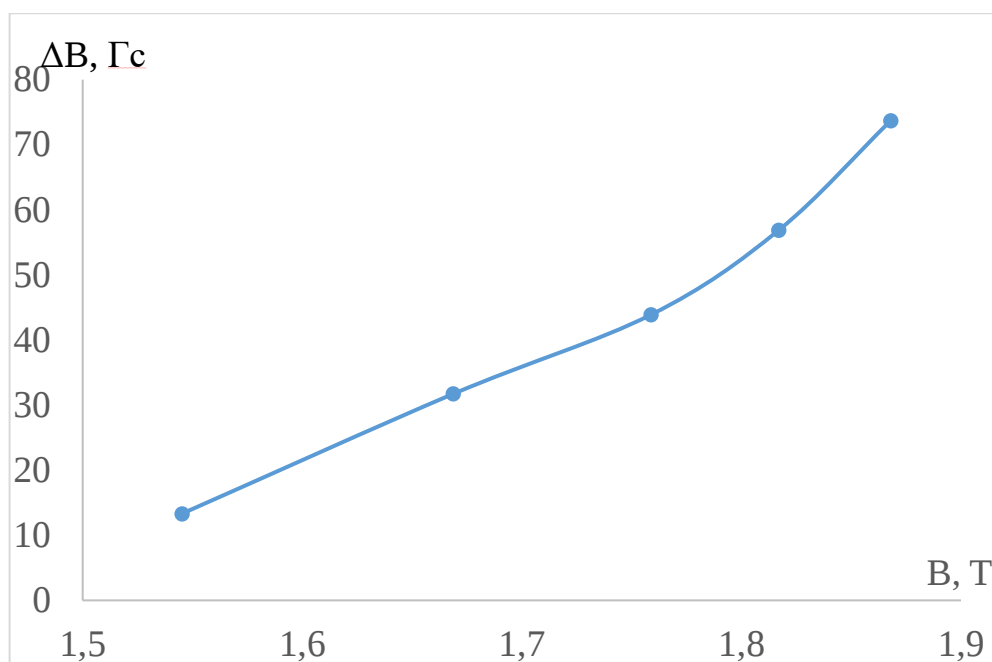


Рисунок 30 – Изменение наклона среднего магнитного поля к радиусу вывода $R=1.78$ м при установке новых катушек в зависимости от уровня среднего поля на радиусе вывода.

Расчеты показали, что изменение размеров и смещение центра масс катушки от исходного вносит изменения в магнитное поле циклотрона. Так, при установке новых катушек радиальный наклон среднего магнитного поля изменится к среднему радиусу вывода $R=1.78$ м, что в свою очередь меняет условия изохронизма для рабочих режимов циклотрона. Изменение размеров катушек электромагнита приводит к изменению наклона среднего поля от 15 Гс до 75 Гс в зависимости от уровня поля (см. рисунок 30), что в свою очередь приводит к необходимости пересмотра параметров рабочих режимов ускорения.

Настройку рабочих режимов циклотрона в новых условиях можно осуществить двумя способами:

1) при помощи радиальных корректирующих катушек. Однако такая подстройка является недостаточной из-за ограниченности рабочих параметров корректирующих катушек циклотрона У400М и может быть использована только в качестве дополнительной.

2) За счет подбора уровня поля и частоты ускоряющего напряжения.

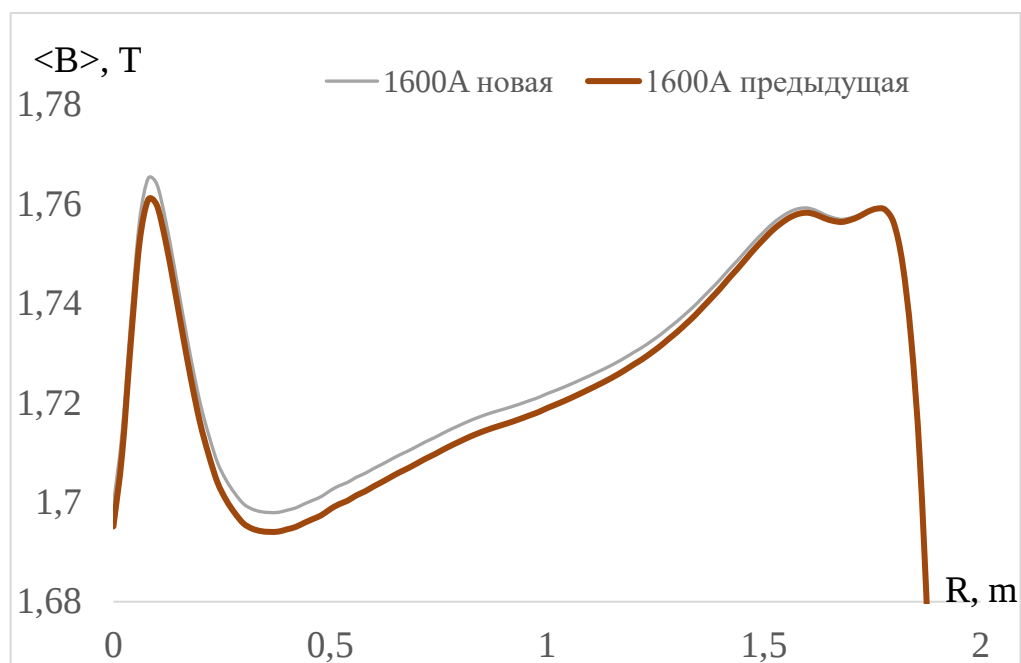


Рисунок 31 – Сравнение результатов расчетов среднего магнитного поля с использованием новой катушки (тонкая линия) и старой катушки (толстая линия) для уровня тока возбуждения электромагнита в 1600А.

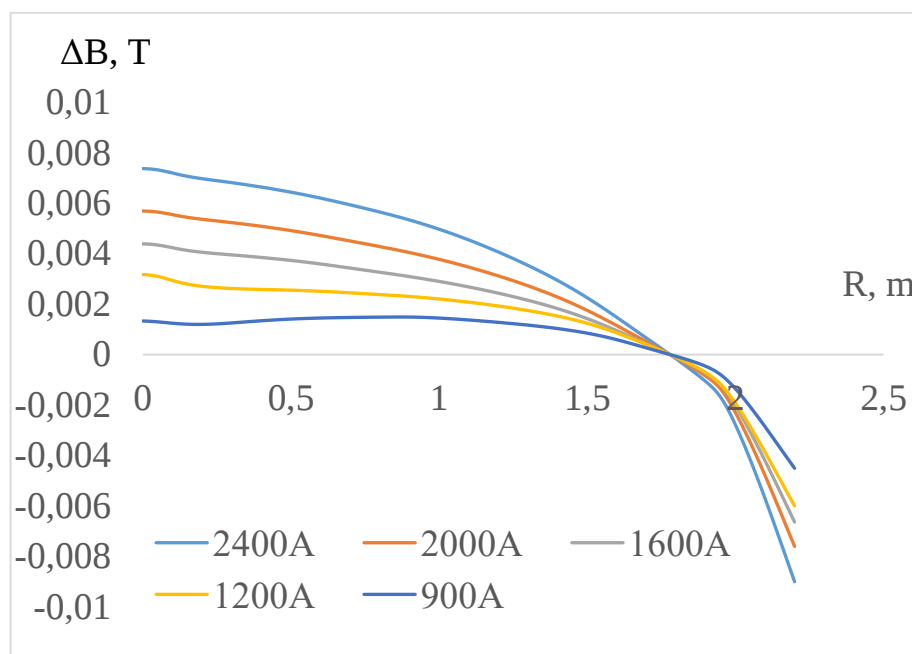


Рисунок 32 – Приведенная к радиусу вывода $R_{\text{экт}} 1.78$ м разница магнитных полей расчетов среднего магнитного поля с новой и старой катушками для 5 уровней магнитного поля (см. рисунок 30).

Отличие в уровнях среднего поля для измерений и проведенных расчетов при одинаковом токе в обмотке объясняется различным значением витков в старой и новой обмотках.

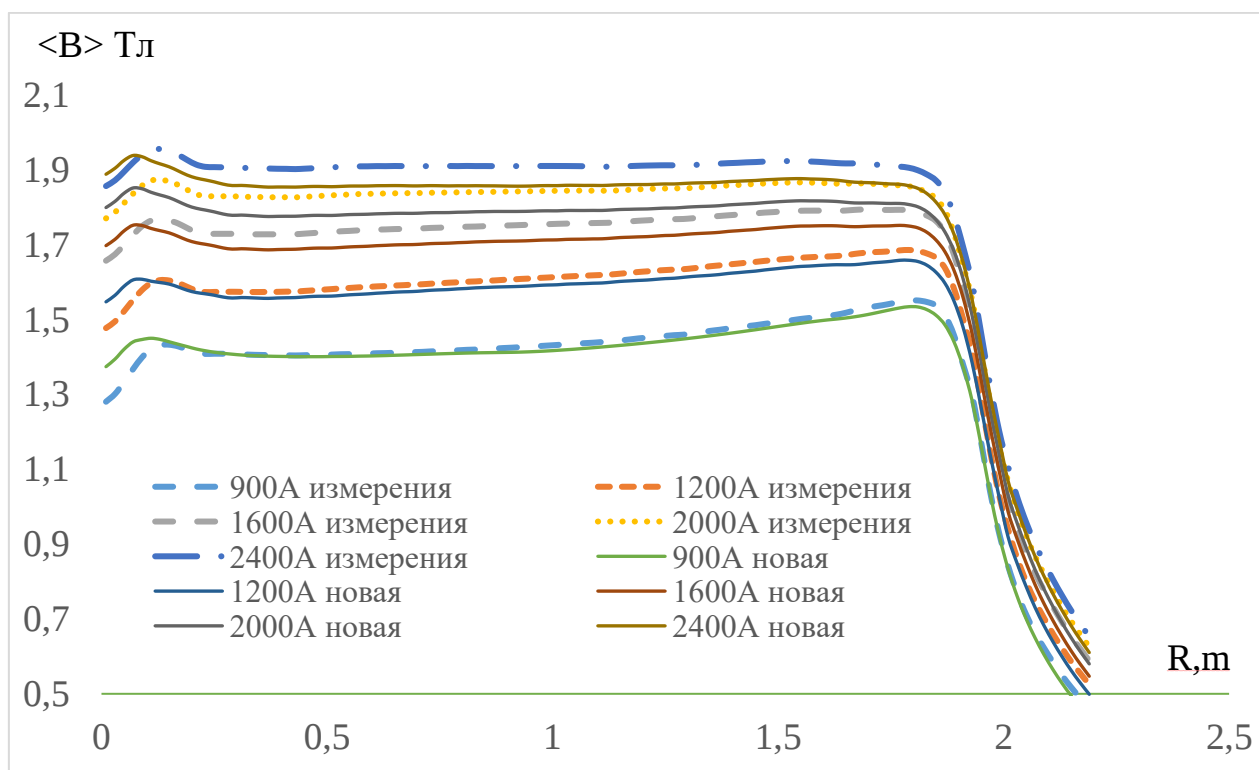


Рисунок 33 – Сравнение результатов измерений (толстая линия) и расчетов (тонкая линия) для 5 уровней тока возбуждения электромагнита.

Отличие в форме результатов измерений и расчетов объясняется:

- 1) неполным соответствием геометрии магнита модели из-за отсутствия актуальных чертежей финальной обработки секторов,
- 2) отсутствием данных о реальных магнитных свойствах стали.

Тем не менее, полученные расчеты дают качественную картину поведения магнитного поля и позволяют оценить степень вносимых изменений при замене основной обмотки.

Результатом подбора является нахождение такого уровня рабочего поля, при котором радиальный рост среднего реального поля будет соответствовать радиальному росту изохронного поля для рассматриваемого

рабочего режима ускорения. При этом частота ускоряющего напряжения также подбирается к найденному рабочему режиму.

Проведенные расчеты показали, что при замене обмотки необходимое изменение уровня рабочего поля и частоты ускоряющего напряжения при подборе рабочих режимов ускорения являются незначительными и укладываются в рабочий диапазон имеющихся источника тока электромагнита и ВЧ генератора циклотрона У400М.

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данной работы является формирование магнитного поля циклотрона У-400М в Opera 3D Tosca с позиции ресурсоэффективности и конкурентоспособности.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить потенциальных потребителей результатов исследования.
2. Провести анализ конкурентных технических решений.
3. Выполнить SWOT-анализ: описать сильные и слабые стороны проекта, выявить возможности и угрозы для реализации проекта.
4. Оценить степень готовности научной разработки к коммерциализации.
5. Построить календарный план-график проведения работ научно-исследовательского проекта.
6. Рассчитать бюджет научного исследования.
7. Определить ресурсную, финансовую, бюджетную, социальную и экономическую эффективности исследования.

3.1 Предпроектный анализ

3.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

В процессе написания магистерской диссертации были определены потенциальные потребители результатов исследования. К ним можно отнести инвестиционные компании, частных инвесторов, научно-исследовательские институты. Для анализа потребителей необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка.

Сегмент рынка – группы потребителей, обладающих определенными общими признаками [20].

Сегментирование – разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга).

В зависимости от категории потребителей необходимо использовать соответствующие критерии сегментирования. Для коммерческих организаций критериями сегментирования могут быть: месторасположение, отрасль, выпускаемая продукция. Для физических лиц критериями сегментирования могут быть: возраст, национальность, образование.

Сегментировать рынок услуг по разработке математической модели можно по следующим критериям: формирование портфеля, управление портфелем.

Услуги по формированию портфеля:

- инвестиционные компании;
- инвесторы (физ. лица);

Услуги по управлению портфелем:

- инвестиционные компании;
- инвесторы (физ. лица).

3.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных решений позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

В данной работе было рассмотрено формирование магнитного поля циклического ускорителя У-400М в программе Opera 3D Tosca, а в качестве конкурента выбрано формирование магнитного поля циклического ускорителя в программе ComsolMultiphysics.

Проведем данный анализ с помощью оценочной карты, которая приведена в таблице 3.

Позиция разработки и конкурентов оценивается по пятибалльной шкале. Веса показателей в сумме должны составлять 1.

Таблица 3 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Б _ф	Б _к	К _ф	К _к
1. Скорость расчёта	0,5	5	4	2,5	2
2. Удобство использования выбранной модели	0,3	5	4	1,5	1,2
3. Простота понимания модели	0,1	5	5	0,5	0,5
4. Надежность модели	0,05	4	4	0,2	0,2
5. Сходимость модели	0,03	4	4	0,12	0,12
6. Адаптивность метода	0,02	4	4	0,08	0,08
Итого	1	27	24	4,9	4,1

Позиция разработки и конкурентов оценивается по пятибалльной шкале. Веса показателей в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot \text{Б}_i, \quad (30)$$

где

B_i – вес показателя (в долях единицы);

Б_i – балл i -го показателя.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что метод расчета магнитного поля модели при помощи Opera 3D Tosca по многим показателям является наиболее предпочтительным по сравнению с методикой расчета магнитного поля модели при помощи ComsolMultiphysics, так как значение 4,9 больше значения 4,1 [21].

3.1.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ представляет собой сводную таблицу, иллюстрирующую связь между внутренними и внешними факторами компании. Целью данного анализа является описание сильных и слабых сторон проекта, выявление возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Приведем матрицу SWOT-анализа для моделирования магнитной системы циклотрона У-400М с применением программы расчета магнитных полей в Opera 3D Tosca.

Таблица 4 – Матрица SWOT - анализа

	Сильные стороны	Слабые стороны
	С1. Высокая точность расчета С2. Наличие дополнительного функционала, облегчающего работу пользователей С3. Высокая скорость обработки информации С4. Наличие мануалов для полноценной корректировки ошибок С5. Эксклюзивность работы С6. Увеличение базы данных для оптимизации циклотронов	Сл1. Высокая потребность ресурсов памяти в моделировании Сл2. Сильная зависимость от мощности и производительности оборудования Сл3. Узкая область применения Сл4. Отсутствие отечественных аналогов программ расчета магнитных полей
Возможности В1. Добавление дополнительных расчетов с учетом пожеланий заказчика В2. Реализация новых способов взаимодействия с другими модулями программы В3. Заказ подобной разработки другими заказчиками	1. В1С2С3 Наличие дополнительных расчетов и высокая скорость обработки данных позволяют достаточно в короткое время добавлять дополнительные функциональные предложения, необходимые заказчику 2. В2С1 – высокая скорость расчета и достаточно удобный интерфейс	2. В1В2Сл1Сл2Сл3 - добавление новых функциональных возможностей, высокая потребность ресурсов памяти, сильная зависимость от мощности и производительности оборудования могут воспрепятствовать реализации новых способов взаимодействия с другими модулями программы.

	позволяют моментально переключаться между различными модулями и проводить расчет с несколькими модулями программы 3.В3С1С2С3 – сильные стороны проекта позволят привлечь потенциальных заказчиков вследствие высоких скоростей построения модели, расчета и обработки данных	3. В3Сл3 – узкая область применения не всегда позволяет произвести необходимые операции расчета, необходимые заказчикам
Угрозы У1. Неверное выполнение операций моделирования пользователем У2. Политические санкции, кризис.	1. У1С4– Наличие мануалов позволяет проводить корректировки моделей 2.У2С2С5 – Эксклюзивность расчетов и отсутствие специалистов по решению технических задач данного типа позволяет обеспечить конкуренцию за счет выполнения различных задач по расчету и оптимизации моделей разного типа	1.У1У2 Сл3Сл4 – слабые стороны проекта вследствие санкций могут привести к проблемам потенциальных обновлений программ расчета магнитных полей

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наиболее эффективными в сложившейся ситуации являются следующие стратегии:

1. Создание потенциальных программ расчета моделей с более упрощенной автоматизированной структурой для проведения операций моделирования магнитных полей

2. Необходимо обучить сотрудников навыкам работы с альтернативными программами, обеспечив высокий уровень конкурентоспособности в случае продолжения политических санкций для обеспечения большей мобильности и мультизадачности исполнителей

3.1.4 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Оценим степень готовности научной разработки к коммерциализации и выясним уровень собственных знаний для ее проведения. Для этого заполним специальную форму, содержащую показатели о степени проработанности проекта с позиции коммерциализации и компетенциям разработчика научного проекта [22].

Таблица 5 – Бланк оценки степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	4	3
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического задела	4	3
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	3
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	3	2
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	2
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	2	1
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	2	1
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	1

9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	2	2
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	3	3
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	2	2
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	3	1
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	2	2
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	2	2
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	3	2
	ИТОГО БАЛЛОВ	42	30

В итоге можно сделать вывод о том, что перспективность коммерциализации находится на среднем уровне. Этот уровень можно повысить путем более детального исследования коммерческой составляющей проекта, которая включает в себя анализ рынков сбыта, разработку бизнес-плана и т.д.

3.1.5 Методы коммерциализации результатов научно-технического исследования

Время продвижения товара на рынок во многом зависит от правильности выбора метода коммерциализации. Для данного научно-технического исследования наиболее предпочтительным является такой метод коммерциализации как инжиниринг. Так как консультант имеет знания и опыт в оказании инженерно-технических услуг, но не имеет возможности построить собственное предприятие, заключается договор с заказчиком. Заказчик имеет собственное производство, но нуждается в дополнительном ведении узконаправленных проектов, которые выступают как вспомогательные для

реализации рабочего процесса. Хотя методика и доступна в открытом доступе, необходимы ресурсы для найма сотрудников. В данном случае заказчику выгоднее заключать договор с компанией извне, а не создавать собственный отдел по расчету какой-либо составляющей процесса. Консультант же способен к выполнению большого количества задач и гибкости в отношении их количества и потраченного на проект времени [22].

3.2 Инициация проекта

Устав научного проекта магистерской работы должен иметь следующую структуру:

1. Цели и результат проекта.

Приведем информацию о заинтересованных сторонах проекта, иерархии целей проекта и критериях достижения целей.

Под заинтересованными сторонами проекта понимаются лица или организации, которые активно участвуют в проекте или интересы которых могут быть затронуты как положительно, так и отрицательно в ходе исполнения или в результате завершения проекта. Информацию по заинтересованным сторонам проекта представим в таблице 6.

Таблица 6 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
НИИ	Использование расчетов для модернизации циклических ускорителей
Управляющие компании	Тестирование электронных компонентов в области нанотехнологий, создание трековых мембран
Частные инвесторы	Получение максимальной доходности в зависимости от вложений

Представим информацию об иерархии целей проекта и критерия достижения целей в таблице 7.

Таблица 7 – Цели и результаты проекта

Цели проекта:	Модернизация циклотрона У-400М с целью дальнейшего применения, формирование магнитного поля ускорителя
---------------	--

Ожидаемые результаты проекта:	Использование ОИЯИ расчетов с целью модернизации циклического ускорителя
Критерии приемки результата проекта:	Схождение результатов расчетов магнитных полей, реализованных в СФУ ЛЯР с реальными измерениями на циклотроне У-400М
Требования к результату проекта:	Требование:
	Удовлетворение потребностей НИИ, управляющих компаний и инвесторов

2. Организационная структура проекта.

Определим участников рабочей группы данного проекта, роль каждого участника в данном проекте, а также функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Представим эту информацию в таблице 8.

Модернизация циклотрона У-400М с целью дальнейшего применения, формирование магнитного поля ускорителя

Таблица 8 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час.
1	Басс В.И., ТПУ, магистр	Формирование магнитного поля циклотрона У-400М в Opera 3D Tosca	Основной разработчик проекта	492
2	Иваненко И.А., ОИЯИ ЛЯР, начальник расчетной группы СФУ	Консультации по основным вопросам темы	Руководитель проекта	62
ИТОГО:				554

3. Ограничения и допущения проекта.

Ограничения проекта – все факторы, которые могут послужить ограничением степени свободы участников команды проекта, а также «границы проекта» – параметры проекта или его продукта, которые не будут реализованных в рамках данного проекта. Представим эту информацию в таблице 9.

Таблица 9 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
3.1. Бюджет проекта	865442
3.1.1. Источник финансирования	ОИЯИ ЛЯР
3.2. Сроки проекта:	4 месяца
3.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	01.02.2022
3.2.2. Дата завершения проекта	22.05.2022

Таким образом, установлены цели и результаты проекта, рассмотрена организационная структура проекта, определены ограничения и допущения проекта [23].

3.3. Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты.

Таблица 10 – Реестр рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Внешний	Санкции, кризис	5	3	средний	Использование аналоговых альтернативных программ расчета	Изменение условий на мировом рынке
2	Финансовый	Повышение уровня инфляции во время реализации проекта	3	3	средний	Использование более дешевых альтернативных средств ПО для расчета магнитных полей	Изменение условий на мировом рынке

3	Проектный	Изменение объемов или сроков работ	3	2	низкий	Использование более удобных для использования программ для более быстрой работы	В зависимости от задач руководства
---	-----------	------------------------------------	---	---	--------	---	------------------------------------

3.4. Планирование научно-исследовательского проекта

Для выполнения работы формируется рабочая группа, в состав которой входит научный руководитель проекта (НР) и исполнитель (И). После чего, в рамках проведения научного исследования выполняется ряд основных этапов, представленных в Таблице 11.

Таблица 11 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение задания	И, НР
	2	Календарное планирование работ по теме	И
	3	Изучение материалов по теме	И
Выбор направления исследований	4	Моделирование магнитного поля циклотрона У-400М	И
	5	Выбор метода выполнения работы	И, НР
Теоретические и экспериментальные исследования	6	Модернизация магнитной системы ускорителя, расчет карт полей циклотрона	И
	7	Анализ результатов работы	И
Обобщение и оценка результатов	8	Составление отчета по работе	И

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный график проекта. Линейный график представлен в таблице 12.

Таблица 12 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
------------	----------	-------------------	-------------------	----------------------	-------------------

1	Составление и утверждение задания магистерской диссертации	2	02.02.2022	03.02.2022	Басс В.И. Иваненко И.А.
2	Календарное планирование работ по теме	4	04.02.2022	08.02.2022	Басс В.И.
3	Изучение материалов по теме	17	09.02.2022	28.02.2022	Басс В.И.
4	Анализ исходных параметров	7	01.03.2022	08.03.2022	Басс В.И.
5	Выбор метода выполнения работы	9	09.03.2022	18.03.2022	Басс В.И. Иваненко И.А.
6	Применение метода к исходным параметрам	35	19.03.2022	27.04.2022	Басс В.И.
7	Анализ результатов работы	16	28.04.2022	15.05.2022	Басс В.И.
8	Составление отчета по работе	6	16.05.2022	22.05.2022	Басс В.И.
ИТОГО:		96			

Диаграмма Ганта – тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

График строится в виде таблицы 13 с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени выполнения научного проекта. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу [21].

Таблица 13 – Календарный план-график проведения работ

	Вид работ	Исполнители	T_{ki}	Продолжительность выполнения работ
--	-----------	-------------	----------	------------------------------------

Код работ				февраль			март			апрель			май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление и утверждение задания магистерской диссертации	Научный руководитель, Исполнитель	2												
2	Календарное планирование работ по теме	Исполнитель	4												
3	Изучение материалов по теме	Исполнитель	17												
4	Моделирование магнитной системы циклотрона в программе Opera 3D Tosca	Исполнитель	7												
5	Выбор метода выполнения работы	Научный руководитель, исполнитель	9				 								
6	Расчет данных результатов моделирования в программе Vscal	Исполнитель	35												
7	Анализ результатов работы	Исполнитель	16												
8	Составление отчета по работе	Исполнитель	6												

 – исполнитель,  – научный руководитель.

Таким образом, построен план управления научным проектом, определены виды работ, установлены даты начала и окончания работ и состав участников.

3.5. Бюджет научного исследования

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В

процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- Нематериальные активы НТИ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).
- Накладные расходы

Отразим стоимости всех материалов, используемых при разработке проекта, включая расходы на их приобретение и, при необходимости, на доставку [20,22].

В работе осуществлялся расчет амортизации оборудования и программного обеспечения, которое было приобретено еще до начала выполнения работ. При выполнении работы использовалась ПЭВМ – ноутбук ASUS TUF Gaming A15 FX506IC-HN020W и программные обеспечения «Opera 3D Tosca», «ComsolMultiphysics» и «Bcalc». Все данные и результаты приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Амортизация активов

№	Наименование оборудования	Количество, шт.	Срок полезного использования, г.	Срок использования в рамках исследования	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.	Амортизация, тыс.руб.
1	Ноутбук ASUS TUF Gaming A15 FX506IC-HN020W	1	3	96	104 999	9205,4
2	Программное обеспечение «Opera 3D Tosca»	1	5	67	5000000	183561,64
3	Программное обеспечение	1	1	67	2000000	367123,29

	«ComsolMultiphysics»					
4	Программное обеспечение «Bcalc»	1	10	67	200000	3671,23
Итого:						563561,56

Обозначим общую стоимость оборудования или ПО за символ M , а количество рабочих дней, в течение которых использовался ноутбук или ПО обозначался символом d .

Срок полезного использования ноутбука по паспорту составляет 3 года. Количество рабочих дней, в течении которых использовался ноутбук составляет 96. Рассчитаем норму амортизации для ноутбука, с учётом того, что срок полезного использования составляет 3 года:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{3} = 0,33$$

Общую сумму амортизационных отчислений для ноутбука находим следующим образом:

$$A = \frac{H_A \times M}{365} d = \frac{0,33 \times 104999}{365} \times 96 = 9205,4$$

Норма амортизации для программного обеспечения «Opera 3D Tosca» при СПИ 5 лет

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{5} = 0,2$$

Общую сумму амортизационных отчислений для программного обеспечения «Opera 3D Tosca» находим следующим образом:

$$A = \frac{H_A \times M}{365} d = \frac{0,2 \times 5000000}{365} \times 67 = 183561,64$$

Норма амортизации для программного обеспечения «ComsolMultiphysics» при СПИ 1 лет

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{1} = 1$$

Общую сумму амортизационных отчислений для программного обеспечения «ComsolMultiphysics» находим следующим образом:

$$A = \frac{H_A \times M}{365} d = \frac{2000000}{365} \times 67 = 367123,29$$

Норма амортизации для программного обеспечения «Vcalc» при СПИ 10 лет

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{10} = 0,1$$

Общую сумму амортизационных отчислений для программного обеспечения «Vcalc» находим следующим образом:

$$A = \frac{H_A \times M}{365} d = \frac{0,1 \times 200000}{365} \times 67 = 3671,23$$

Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) руководителя (исполнителя) от предприятия рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_p, \quad (31)$$

где

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

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

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (32)$$

где

Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: 10,4;

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

Месячный должностной оклад работника:

$$З_m = З_{tc} \cdot (1 + k_{пр}) \cdot k_p, \quad (33)$$

$З_{tc}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3;

k_p – районный коэффициент, равный 1,15 (г. Дубна).

Таблица 15 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Научный руководитель	Исполнитель
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней выходные дни/праздничные дни	66	66
Потери рабочего времени: отпуск/невыходы по болезни	56	56
Действительный годовой фонд рабочего времени	243	243

Приведем расчет заработной платы для научного руководителя:

$$З_m = 70000 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1,15 = 104650 \text{ руб.}$$

$$З_{дн} = \frac{104650 \cdot 10,4}{243} = 4478,85 \text{ руб.}$$

$$З_{осн} = 4478,85 \cdot 11 = 49267,35 \text{ руб.}$$

Приведем расчет заработной платы для исполнителя:

$$З_m = 14800 \cdot (1 + 0,3) \cdot 1,15 = 22126 \text{ руб.}$$

$$З_{дн} = \frac{22126 \cdot 10,4}{243} = 946,96 \text{ руб.}$$

$$З_{осн} = 946,96 \cdot 96 = 90908,16 \text{ руб.}$$

Расчет основной заработной платы приведем в таблице 16.

Таблица 16 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	Оклад, руб.	$k_{пр}$	k_p	$З_m$, руб	$З_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$З_{осн}$, руб.
Научный руководитель	70000	0,3	1,15	104650	4478,85	11	49267,35

Исполнитель	14800	0,3	1,15	22126	946,96	96	90908,16
Итого:							<u>140175,51</u>

Отразим обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников [21].

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot Z_{\text{осн}}, \quad (34)$$

$k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Расчет отчислений во внебюджетные фонды приведем в таблице 17.

Таблица 17 – Расчет отчислений во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.
Научный руководитель	49267,35
Исполнитель	90908,16
Коэффициент отчислений	0,302
Итого:	<u>42333,01</u>

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Расчет бюджета научно-исследовательской работы приведен в таблице 18.

Накладные расходы включают в себя следующие расходы: печать ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергию и т.д. Рассчитывается общая сумма накладных расходов следующим образом:

$$\begin{aligned}
 Z_{\text{накл}} &= k_{\text{нр}} \times (\text{сумма статей } 1 - 3) \\
 &= 0,16 \times (42333,01 + 140175,51 + 563561,56) \\
 &= 119371,21 \text{ руб}
 \end{aligned}$$

$k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы, 16%

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Расчет бюджета научно-исследовательской работы приведен в таблице 18.

Таблица 18 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Амортизационные отчисления	563561,56
2. Основная заработная плата	140175,51
3. Отчисления во внебюджетные фонды	42333,01
4. Накладные расходы	119371,21
Бюджет затрат:	865441,29

Таким образом, проведено планирование бюджета научного исследования, рассчитаны материальные затраты, основная заработная плата руководителя и исполнителя, отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) и накладные расходы предприятия. Бюджет затрат составил 865441,29 рублей [23].

3.6. Оценка абсолютной эффективности НИ

Для оценки общей экономической эффективности используются основные показатели:

- чистая текущая стоимость (NPV);
- индекс доходности (PI);
- внутренняя ставка доходности (IRR);
- срок окупаемости (DPP).

3.6.1. Чистая текущая стоимость

Чистая текущая стоимость (NPV) – это показатель экономической эффективности инвестиционного проекта, который рассчитывается путём

дисконтирования (приведения к текущей стоимости, т.е. на момент инвестирования) ожидаемых денежных потоков (как доходов, так и расходов).

Расчёт NPV осуществляется по следующей формуле:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_{опt}}{(1+i)^t} - I_0$$

где: ЧДП_{опt} – чистые денежные поступления от операционной деятельности;

I_0 – разовые инвестиции, осуществляемые в нулевом году;

t – номер шага расчета ($t = 0, 1, 2 \dots n$)

n – горизонт расчета;

i – ставка дисконтирования (желаемый уровень доходности инвестируемых средств).

Расчёт NPV позволяет судить о целесообразности инвестирования денежных средств. Если $NPV > 0$, то проект оказывается эффективным.

Расчет чистой текущей стоимости представлен в таблице 19.

Таблица 19 – Расчет чистой текущей стоимости по проекту в целом

№	Наименование показателей	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4
1	Выручка от реализации, тыс. руб.	0	1000	1000	1000	1000
2	Итого приток, тыс. руб.	0	1000	1000	1000	1000
3	Инвестиционные издержки, тыс. руб.	-866	0	0	0	0
4	Операционные затраты, тыс. руб.	0	150	150	150	150
5	Налогооблагаемая прибыль(1-4)	0	850	850	850	850
6	Налоги, тыс. руб. (20%)	0	170	170	170	170
7	Чистая прибыль, тыс. руб.(5-6)	-866	680	680	680	680

8	Чистый денежный поток (ЧДП), тыс. руб.(чистая прибыль+амортизация)	-866	680	680	680	680
9	Коэффициент дисконтирования при $i=10\%$ (КД)	1	<u>0,909</u>	<u>0,826</u>	<u>0,751</u>	<u>0,683</u>
10	Чистый дисконтированный денежный поток (ЧДД), тыс. руб. (9*10)	-866	618.12	561.68	510.68	464.44
11	$\sum$ ЧДД, тыс. руб.	1288.92				
12	Итого NPV, тыс. руб.	1313.32				

3.6.2. Дисконтированный срок окупаемости

Как отмечалось ранее, одним из недостатков показателя простого срока окупаемости является игнорирование в процессе его расчета разной ценности денег во времени.

Этот недостаток устраняется путем определения дисконтированного срока окупаемости.

Рассчитывается данный показатель примерно по той же методике, что и простой срок окупаемости, с той лишь разницей, что последний не учитывает фактор времени.

Наиболее приемлемым методом установления дисконтированного срока окупаемости является расчет кумулятивного (нарастающим итогом) денежного потока [21].

Таблица 20 – Дисконтированный срок окупаемости

№	Наименование показателя	Шаг расчета				
		0	1	2	3	4

1	Дисконтированный чистый денежный поток, руб.	-866	618.12	561.68	510.68	464.44
2	То же нарастающим итогом, руб.	-866	-247,88	313.8	824.48	1288.92
3	Дисконтированный срок окупаемости	$DP_{дск} = 1 + 247.88 / 561.68 = 1.44$ года				

3.6.3. Внутренняя ставка доходности

Для установления показателя чистой текущей стоимости (NPV) необходимо располагать информацией о ставке дисконтирования, определение которой является проблемой, поскольку зависит от оценки экспертов. Поэтому, чтобы уменьшить субъективизм в оценке эффективности инвестиций на практике широкое распространение получил метод, основанный на расчете внутренней ставки доходности (IRR). Между чистой текущей стоимостью (NPV) и ставкой дисконтирования (i) существует обратная зависимость. Эта зависимость следует из таблицы 21 и графика, представленного на рисунке 34.

Таблица 21 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

№	Наименования показателя	0	1	2	3	4	NPV
1	Чистые денежные потоки	-866000	680000	680000	680000	680000	
2	Коэффициент дисконтирования						
	$i=0,1$	1	0.909	0.826	0.751	0.683	
	$i=0,2$	1	0.833	0.694	0.578	0.482	
	$i=0,3$	1	0.769	0.592	0.455	0.35	
	$i=0,4$	1	0.714	0.51	0.364	0.26	
	$i=0,5$	1	0.667	0.444	0.295	0.198	
	$i=0,6$	1	0.625	0.390	0.244	0.095	
	$i=0,7$	1	0.588	0.335	0.203	0.07	
3	Дисконтированный денежный поток						

	$i=0,1$	-866000	618120	561680	510680	464440	1288920
	$i=0,2$	-866000	566440	471920	393040	327760	893160
	$i=0,3$	-866000	522920	402560	309400	238000	606880
	$i=0,4$	-866000	485520	346800	247520	176800	391640
	$i=0,5$	-866000	453560	301920	200600	134640	224720
	$i=0,6$	-866000	425000	265200	165920	64600	54720
	$i=0,7$	-866000	399840	227800	138040	47600	-52720

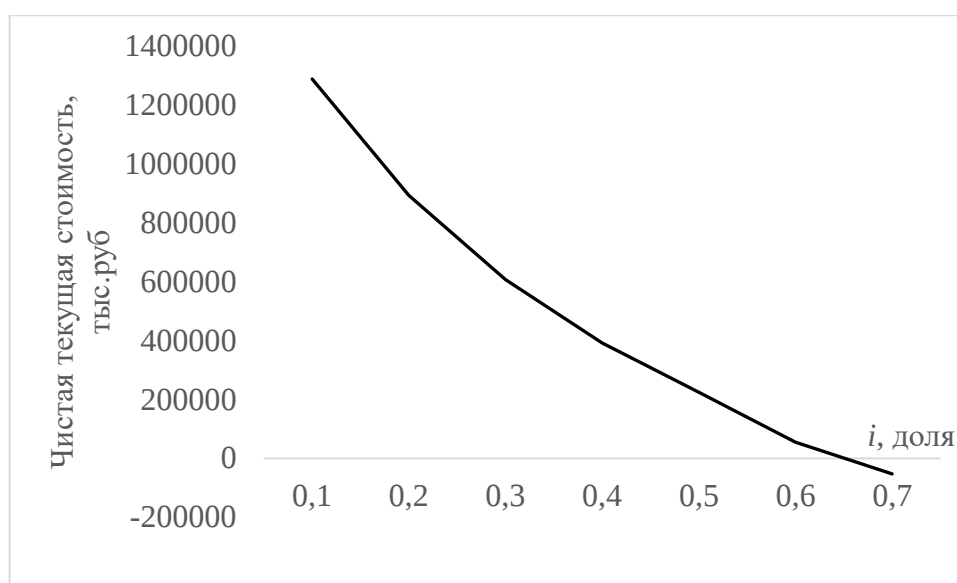


Рисунок 34 – Зависимость NPV от ставки дисконтирования

Из таблицы 21 и графика следует, что по мере роста ставки дисконтирования чистая текущая стоимость уменьшается, становясь отрицательной. Значение ставки, при которой NPV обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности» или «внутренней нормы прибыли». Из графика получаем, что IRR составляет 0,65 [21,23].

3.7. Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности научного исследования

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

Интегральный финансовый показатель разработки:

$$I_{\text{финр}}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (35)$$

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

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

Интегральный показатель ресурсоэффективности:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (36)$$

где

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i – балльная оценка i -го варианта исполнения разработки.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в таблице 22.

Таблица 22 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

ПО \ Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,10	5	4
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,15	5	4
3. Помехоустойчивость	0,20	4	4
4. Энергосбережение	0,20	4	4
5. Надежность	0,25	4	4
6. Материалоемкость	0,10	3	3
Итого:	1	25	23

$$I_{\text{тп}} = 5 \cdot 0,1 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,1 = 4,15$$

$$I_{\text{аналог}} = 4 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,1 = 3,9$$

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

$$I_{\text{исп.}i} = \frac{I_{p-\text{исп.}i}}{I_{\text{финр.}i}} \quad (37)$$

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп.1}}}{I_{\text{исп.2}}} \quad (38)$$

Таблица 23 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Разработка	Аналог
	Интегральный финансовый показатель разработки	1	1
	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,15	3,9
	Интегральный показатель эффективности	4,15	3,9
	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,065	

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

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разрабатываемый проект является более эффективным вариантом решения поставленной задачи по сравнению с предложенным аналогом, основываясь на показателях эффективности [23].

Выводы по разделу

1. Потенциальными потребителями результатов исследования являются инвестиционные компании, частные инвесторы.
2. В результате проведения анализа конкурентных технических решений сделан вывод о том, что выбранный метод моделирования магнитной системы ускорителя в силу своей простоты и уникальности является наиболее предпочтительным, чем альтернативные технологии, используемые в расчете на данный момент.
3. Определены сильные и слабые стороны проекта, выявлены возможности и угрозы для реализации проекта. По итогам выполнения SWOT-анализа выбраны наиболее эффективные стратегии.
4. Оценка степени готовности научной разработки к коммерциализации показала средний уровень, который можно повысить путем более детального исследования коммерческой составляющей проекта.
5. В процессе планирования научно-исследовательского проекта построен план управления научным проектом, определены виды работ, установлены даты начала и окончания работ и состав участников.
6. При планировании бюджета рассчитаны материальные затраты, основная заработная плата руководителя и инженера, отчисления во внебюджетные фонды. Бюджет затрат составил 865441,29рублей.
7. Оценка эффективности исследования показала, что разрабатываемый проект является более эффективным вариантом решения поставленной задачи по сравнению с предложенным аналогом.

4. Социальная ответственность

Социальная ответственность - ответственность отдельного ученого и научного сообщества перед обществом. Первостепенное значение при этом имеет безопасность применения технологий, которые создаются на основе достижений науки, предотвращение или минимизация возможных негативных последствий их применения, обеспечение безопасного как для испытуемых, как и для окружающей среды проведения исследований.

В данной работе расчет формирования магнитного поля циклотрона У-400М. Работа выполнялась в Лаборатории ядерных реакций им. Флёрова (ОИЯИ) в кабинете № 221. Раздел также включает в себя оценку условий труда на рабочем месте, анализ вредных и опасных факторов труда, разработку мер защиты от них.

4.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

4.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства

Основные положения по охране труда изложены в Трудовом кодексе Российской Федерации. В этом документе указано, что охрана здоровья трудящихся, обеспечение безопасных условий труда, ликвидация профессиональных заболеваний и производственного травматизма являются одной из главных забот государства.

Согласно Трудовому кодексу Российской Федерации каждый работник имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;
- получение достоверной информации от работодателя, соответствующих государственных органов и общественных организаций об

условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья, а также о мерах по защите от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов;

- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда;

- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;

- обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя;

- личное участие или участие через своих представителей в рассмотрении вопросов, связанных с обеспечением безопасных условий труда на его рабочем месте, и в расследовании происшедшего с ним несчастного случая на производстве или профессионального заболевания;

- внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;

- гарантии и компенсации, установленные в соответствии с настоящим Кодексом, коллективным договором, соглашением, локальным нормативным актом, трудовым договором, если он занят на работах с вредными и (или) опасными условиями труда.

В трудовом кодексе Российской Федерации говорится, что нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю, работодатель обязан вести учет времени, отработанного каждым работником [24].

4.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации.

То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как изображено на рисунке 35.

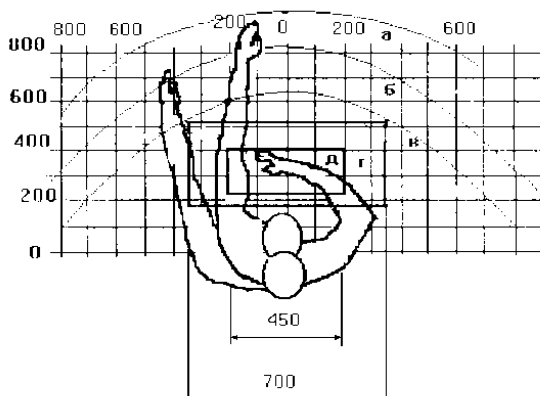


Рисунок 35. Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости: а - зона максимальной досягаемости рук; б - зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в - зона легкой досягаемости ладони; г - оптимальное пространство для грубой ручной работы; д - оптимальное пространство для тонкой ручной работы

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- клавиатура - в зоне г, д;
- системный блок размещается в зоне б (слева);
- принтер находится в зоне а (справа);
- литература и документация, необходимая при работе находится в зоне легкой досягаемости ладони - в (слева);
- в выдвижных ящиках стола - литература, не используемая постоянно [25].

При выборе рабочего места, а именно письменного стола должны быть учтены следующие требования, которые представлены в таблице 24.

Таблица 24 – Требования к оснащению рабочего места, предусматривающего длительную работу за ПК

Ширина рабочего стола	От 80 до 140 см
Высота рабочего стола	75 см
Глубина рабочего стола	От 60 до 80 см
Расстояние от глаз до монитора	От 50 до 60 см
Расстояние клавиатуры от края стола	От 10 до 30 см
Сидение	Должно позволять регулировку по высоте, повороту и углу наклона спинки (регулировки должны быть независимыми друг от друга)
Пространство для ног	Ширина от 30 см, глубина – от 40 см, с углом наклона до 20 градусов

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 градусов. Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране [25].

Также должна предусматриваться возможность регулировки экрана монитора:

- по высоте +3 см;
- наклон относительно вертикали 10 - 20 градусов;
- в левом и правом направлениях.

В случае если работа оператора предполагает однообразную умственную работу, которая требует значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, то лучше всего выбирать неяркие, малоконтрастные цветовые оттенки (слабонасыщенные оттенки холодного голубого или зеленого цветов), которые не ослабляют внимание. Если работа требует большой умственной и физической напряженности, тогда следует использовать более теплые оттенки, которые способствуют повышению концентрации внимания [25].

4.2 Производственная безопасность

4.2.1 Анализ вредных и опасных факторов

Производственные условия на месте выполнения работы характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые по природе возникновения делятся на следующие группы:

- 1) физические;
- 2) химические;
- 3) психофизиологические;
- 4) биологические.

Опасные и вредные факторы, которые могут воздействовать на персонал при работе на ПЭВМ, приведены в таблице 25.

Таблица 25 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы	Нормативные документы
1. Отклонение показателей микроклимата	СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [26]
2. Повышенный уровень электромагнитного излучения	ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности [27]
3. Недостаточная освещенность рабочей зоны	СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий [28]
4. Превышение уровня шума	СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки [29]
5. Психофизиологические факторы	СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» [30]

6. Поражение электрическим током	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов [31]
7. Пожаровзрывоопасность	ГОСТ 12.1.044-2018 ССБТ Пожаровзрывоопасность веществ и материалов [32]

К психологически вредным факторам, воздействующим на персонал, можно отнести:

- 1) нервно - эмоциональные перегрузки;
- 2) умственное напряжение;
- 3) физические перегрузки.

Биологические и химические вредные производственные факторы отсутствуют.

4.2.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия вредных и опасных факторов

В соответствии с основными требованиями к помещениям для эксплуатации ПЭВМ [25] они должны иметь естественное и искусственное освещение. Площадь на одно рабочее место пользователей ПЭВМ должна составлять не менее 6 м².

4.2.3 Отклонение показателей микроклимата

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с нормами и приведены в таблице 26.

Таблица 26 – Оптимальные параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23-25	40-60	0,1

Теплый	22-24	40	0,1
--------	-------	----	-----

Отклонение показателей микроклимата от нормы не вызывает повреждений или нарушений состояния здоровья, но может приводить к возникновению общих и локальных ощущений теплового дискомфорта, напряжению механизмов терморегуляции, ухудшению самочувствия и понижению работоспособности [26].

Для обеспечения установленных норм микроклиматических параметров и чистоты воздуха на рабочих местах и в помещениях применяют вентиляцию.

Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. Оптимальная кратность воздухообмена в производственных помещениях находится в достаточно широких пределах: от 3 до 40 раз в час [26]. В используемом помещении установлен кондиционер марки KSFV140XFAN3 производительностью $Q = 889 - 1064 \text{ м}^3/\text{час}$. Объем помещения № 221 Лаборатории Ядерных Реакций – ОИЯИ составляет:

$$V = a \cdot b \cdot h = 6 \text{ м} \cdot 6 \text{ м} \cdot 3,5 \text{ м} = 126 \text{ м}^3. \quad (39)$$

Данный вентилятор обеспечивает следующую кратность воздухообмена (ВО) в лаборатории:

$$BO = \frac{Q}{V} = \frac{889 \div 1064}{126} = 7,05 \div 8,44 \text{ ч}^{-1} \quad (40)$$

Таким образом установлено, что микроклимат помещения № 221 Лаборатории Ядерных Реакций – ОИЯИ соответствует оптимальным условиям работы.

4.2.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения

Электромагнитное излучение - распространяющееся в пространстве возмущение (изменение состояния) электромагнитного поля.

Экран и системные блоки ЭВМ производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см

вокруг экрана по электрической составляющей должна соответствовать таблице 27 [27].

Повышенный уровень электромагнитного излучения может негативно влиять на организм человека, а именно приводить к нервным расстройствам, нарушению сна, значительному ухудшению зрительной активности, ослаблению иммунной системы, расстройствам сердечно-сосудистой системы [27].

Таблица 27 – Допустимые уровни параметров электромагнитного поля

Наименование параметров		Величина допустимого уровня
Напряженность электромагнитного поля	Диапазон частот 5 Гц – 2 кГц	25 В/м
	Диапазон частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	Диапазон частот 5 Гц – 2 кГц	250 нТл
	Диапазон частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты [27].
- Таким образом установлено, что в помещении № 221 Лаборатории Ядерных Реакций – ОИЯИ уровень электромагнитного излучения соответствует санитарным нормам.

4.2.5 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

По нормативам освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300-500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк [28].

Яркость светильников общего освещения в зоне углов излучения от 50 до 90° с вертикалью в продольной и поперечной плоскостях должна составлять не более 200 кд/м, защитный угол светильников должен быть не менее 40°. Коэффициент запаса (K_z) для осветительных установок общего освещения должен приниматься равным 1,4. Коэффициент пульсации не должен превышать 5 %.

Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПЭВМ должно осуществляться:

- системой общего равномерного освещения.

В производственных и административно-общественных помещениях, в случаях преимущественной работы с документами, следует применять системы:

- комбинированного освещения (к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники;
- местного освещения, предназначенные для освещения зоны расположения документов) [28].

Площадь помещения:

$$S = a \cdot b, \quad (41)$$

где A – длина, м; B – ширина, м.

$$S = 6 \cdot 6 = 36 \text{ м}^2,$$

Коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, без штор $\rho_c = 50 \%$, свежепобеленного потолка $\rho_{II} = 70 \%$. Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен $K_z = 1,5$. Коэффициент неравномерности для светодиодных лент $Z = 1,2$. ARS/R 418

Выбираем светодиоды ARS/R 418, световой поток которых равен $\Phi_{лд} = 3000 \text{ Лм}$.

Выбираем светильники со светодиодами типа DLS043. Этот светильник имеет две светодиодные ленты мощностью 9 Вт каждая, длина светильника равна 1260 мм, ширина – 124 мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина λ , которая для светодиодных светильников с защитным рассеивателем лежит в диапазоне 1,1 – 1,3. Принимаем $\lambda = 1,1$, расстояние светильников от перекрытия (свес) $h_c = 0,5$ м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p, \quad (42)$$

где h_n – высота светильника над полом, высота подвеса, h_p – высота рабочей поверхности над полом.

Наименьшая допустимая высота подвеса над полом для двухлентовых светильников DLS043: $h_n = 3,5$ м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_p - h_c = 3,5 - 1 - 0,5 = 2 \text{ м.} \quad (43)$$

Из формулы

$$\Phi_l = \frac{(E \cdot S \cdot K_z \cdot Z)}{N \cdot \eta} \quad (44)$$

находим число светодиодных лент N

$$N = \frac{(E \cdot S \cdot K_z \cdot Z)}{\Phi_l \cdot \eta}. \quad (45)$$

η определяем через индекс помещения по формуле:

$$i = \frac{(a \cdot b)}{h \cdot (a + b)} = \frac{6 \cdot 6}{2(6 + 6)} = 1,5. \quad (46)$$

Коэффициент использования светового потока, показывающий какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность, для светильников типа DLS043 со светодиодными лентами при $\rho_{\Pi} = 70 \%$,

$\rho_c = 50 \%$ и индексе помещения $i = 1,71$ равен $\eta = 0,5$.

Тогда

$$N = \frac{(E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z)}{\Phi_{\text{л}} \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 36 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{3000 \cdot 0,5} = 11,88 \text{ лент.}$$

Принимаем количество светодиодных лент 12. При этом получается 6 светильников, т.е. 2 ряда по 3 светильника.

Потребный световой поток светодиодных ламп:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{(E \cdot S \cdot K_3 \cdot Z)}{N \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 36 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{12 \cdot 0,5} = 2970 \text{ Лм.}$$

Из условий равномерности освещения определяем расстояния L_1 и $\frac{L_1}{3}$,

L_2 и $\frac{L_2}{3}$ по следующим уравнениям:

$$6000 = L_1 + \frac{2}{3} \cdot L_1 + 2 \cdot 124; L_1 = 3451 \text{ мм}, \frac{L_1}{3} = 1150 \text{ мм}; \quad (47)$$

$$6000 = 2 \cdot L_2 + \frac{2}{3} \cdot L_2 + 3 \cdot 1260; L_2 = 832 \text{ мм}, \frac{L_2}{3} = 277 \text{ мм}. \quad (48)$$

На рисунке 36 изображен план помещения и размещения светильников со светодиодными лентами в помещении № 221 Лаборатории Ядерных Реакций – ОИЯИ.

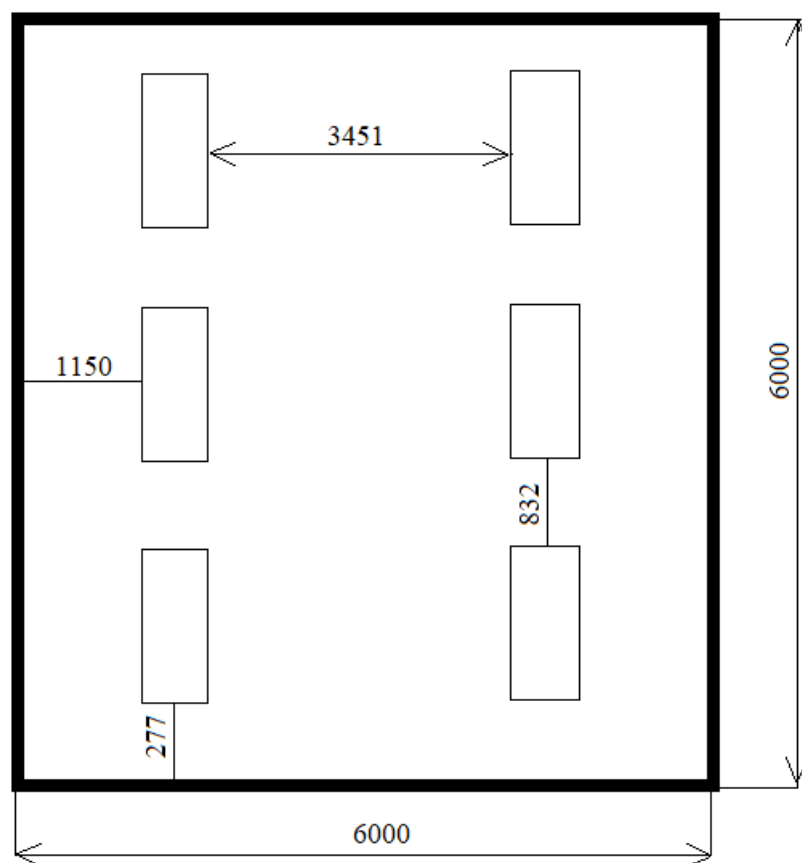


Рисунок 36. План помещения и размещения светильников со светодиодными лентами

Делаем проверку выполнения условия:

$$\frac{-10\% \leq (\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{л}})}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100 \% \leq 20 \%;$$
 (49)

$$\frac{(\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{л}})}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100 \% = \frac{(3000 - 2970)}{3000} \cdot 100 \% = 1 \%.$$

Таким образом, мы получили, что необходимый световой поток не выходит за пределы требуемого диапазона. Мощность осветительной установки получилась:

$$P = 12 \cdot 9 = 108 \text{ Вт}.$$

Расчётное количество светильников фактически установлено в помещении № 221 Лаборатории Ядерных Реакций – ОИЯИ.

4.2.6 Превышение уровня шума

Шум, являясь общебиологическим раздражителем, оказывает влияние не только на слуховой анализатор, но действует на структуры головного мозга, вызывая сдвиги в различных функциональных системах организма. Среди многочисленных проявлений неблагоприятного воздействия шума на организм человека выделяются: снижение разборчивости речи, неприятные ощущения, развитие утомления и снижение производительности труда, появление шумовой патологии. В нашем случае источником шума является откачивающий компрессор. Уровень шума компрессора менее 55 дБ, что соответствует санитарным нормам [29].

В таблице 28 приведены нормы уровня шума при различных видах работ.

Таблица 28 – Нормативы уровня шума при различных видах работ

	Максимально допустимый уровень шума (дБ), в полосах следующих октав (Гц)									Эквивалентные уровни шума, дБА
Научная работа, расчеты, конструирование	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50
Офисы, лаборатории	93	79	70	68	58	55	52	52	49	55

4.2.7 Психофизиологические факторы

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

Трудовая деятельность работников непроизводственной сферы относится к категории работ, связанных с использованием больших объемов информации, с применением компьютеризированных рабочих мест, с частым принятием ответственных решений в условиях дефицита времени, непосредственным контактом с людьми разных типов темперамента и т.д. Это обуславливает высокий уровень нервно-психической перегрузки, снижает

функциональных на активность центральной нервной системы, приводит к расстройствам в ее деятельности, развития утомления, переутомления, стрессу.

Наиболее эффективные средства предупреждения утомления при работе на производстве – это средства, нормализующие активную трудовую деятельность человека. На фоне нормального протекания производственных процессов одним из важных физиологических мероприятий против утомления является правильный режим труда и отдыха [30].

4.2.8 Поражение электрическим током

К опасным факторам можно отнести наличие в помещении большого количества аппаратуры, использующей однофазный электрический ток напряжением 220 В и частотой 50 Гц. По опасности электропоражения комната относится к помещениям без повышенной опасности, так как отсутствует повышенная влажность, высокая температура, токопроводящая пыль и возможность одновременного сприкосновения токоведущих элементов с заземленными металлическими корпусами оборудования [31].

Лаборатория относится к помещению 2 классу, т.е. без повышенной опасности поражения электрическим током. Безопасными номиналами являются: $I < 0,1$ А; $U < (2-36)$ В; $R_{\text{зазем}} < 4$ Ом. В помещении применяются следующие меры защиты от поражения электрическим током: недоступность токоведущих частей для случайного прикосновения, все токоведущие части изолированы и ограждены. Недоступность токоведущих частей достигается путем их надежной изоляции, применения защитных ограждений (кожухов, крышек, сеток и т.д.), расположения токоведущих частей на недоступной высоте [33].

Каждому необходимо знать меры медицинской помощи при поражении электрическим током. В любом рабочем помещении необходимо иметь медицинскую аптечку для оказания первой медицинской помощи.

Поражение электрическим током чаще всего наступает при небрежном обращении с приборами, при неисправности электроустановок или при их повреждении [31].

Для освобождения пострадавшего от токоведущих частей необходимо использовать непроводящие материалы. Если после освобождения пострадавшего из-под напряжения он не дышит, или дыхание слабое, необходимо вызвать бригаду скорой медицинской помощи и оказать пострадавшему доврачебную медицинскую помощь:

- обеспечить доступ свежего воздуха (снять с пострадавшего стесняющую одежду, расстегнуть ворот);
- очистить дыхательные пути;
- приступить к искусственной вентиляции легких (искусственное дыхание);
- в случае необходимости приступить к непрямому массажу сердца [31].

Любой электроприбор должен быть немедленно обесточен в случае:

- возникновения угрозы жизни или здоровью человека;
- появления запаха, характерного для горящей изоляции или пластмассы;
- появления дыма или огня;
- появления искрения;
- обнаружения видимого повреждения силовых кабелей или коммутационных устройств.

Для защиты от поражения электрическим током используют СИЗ и СКЗ.

Средства коллективной защиты:

1. Заземление источников электрического тока;
2. Использование щитов, барьеров, клеток, ширм, а также заземляющих и шунтирующих штанг, специальных знаков и плакатов [31].

Средства индивидуальной защиты: использование диэлектрических перчаток, изолирующих клещей и штанг, слесарных инструментов с изолированными рукоятками, указатели величины напряжения, калоши, боты, подставки и коврики [33].

4.3 Экологическая безопасность

Работа за персональной ЭВМ не являются экологически опасными работами, потому объект, на котором производилась разработка продукта, а также объекты, на которых будет производиться его использование операторами персональной ЭВМ относятся к предприятиям пятого класса, размер селитебной зоны для которых равен 50 м [34].

Современные персональные ЭВМ производят практически без использования вредных веществ, опасных для человека и окружающей среды. Исключением являются аккумуляторные батареи компьютеров и мобильных устройств. В аккумуляторах содержатся тяжелые металлы, кислоты и щелочи, которые могут наносить ущерб окружающей среде, попадая в гидросферу и литосферу, если они были неправильно утилизированы. Для утилизации аккумуляторов необходимо обращаться в специальные организации, специализировано занимающиеся приемом, утилизацией и переработкой аккумуляторных батарей [34].

Утилизацию компьютера можно провести следующим образом:

- отделить металлические детали от неметаллов;
- разделить углеродистые металлы от цветмета;
- пластмассовые изделия (крупногабаритные) измельчить для уменьшения объема;
- копир-порошок упаковать в отдельную упаковку, точно также, как и все проклассифицированные и измельченные компоненты оргтехники, и после

накопления на складе транспортных количеств отправить предприятиям и фирмам, специализирующимся по переработке отдельных видов материалов.

Люминесцентные лампы, применяющиеся для искусственного освещения рабочих мест, также требуют особой утилизации, т.к. в них присутствует от 10 до 70 мг ртути, которая относится к чрезвычайно опасным химическим веществам и может стать причиной отравления живых существ, а также загрязнения атмосферы, гидросферы и литосферы. Сроки службы таких ламп составляют около 5-ти лет, после чего их необходимо сдавать на переработку в специальных пунктах приема. Юридические лица обязаны сдавать лампы на переработку и вести паспорт для данного вида отходов [34].

4.4 Пожарная и взрывная безопасность

Возникновение пожара является опасным производственным фактором, т.к. пожар на предприятии наносит большой материальный ущерб, а также часто сопровождается травмами и несчастными случаями. Регулирование пожаробезопасности производится ГОСТ 12.1.004-91 [35].

В зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д [35]. Так как помещение лаборатории по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий

В помещениях с персональной ЭВМ повышен риск возникновения пожара из-за присутствия множества факторов: наличие большого количества электронных схем, устройств электропитания, устройств кондиционирования воздуха; возможные неисправности электрооборудования, освещения, или неправильная их эксплуатация может послужить причиной пожара.

Возможные виды источников воспламенения:

- 1) искра при разряде статического электричества;

- 2) искры от электрооборудования;
- 3) искры от удара и трения;
- 4) открытое пламя.

Для профилактики пожара должен проводиться следующий комплекс организационных мер: должны обеспечиваться регулярные проверки пожарной сигнализации, первичных средств пожаротушения; должен проводиться инструктаж и тренировки по действиям в случае пожара; не должны загромождаться или блокироваться пожарные выходы; должны выполняться правила техники безопасности и технической эксплуатации электроустановок; во всех служебных помещениях должны быть установлены «Планы эвакуации людей при пожаре и других ЧС», регламентирующие действия персонала при возникновении пожара [35].

Для предотвращения пожара помещение с персональной ЭВМ должно быть оборудовано первичными средствами пожаротушения: углекислотными огнетушителями типа ОУ-2 или ОУ-5; пожарной сигнализацией, а также, в некоторых случаях, автоматической установкой объемного газового пожаротушения.

Для предупреждения пожара и взрыва необходимо предусмотреть:

- специальные изолированные помещения для хранения и разлива легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), оборудованные приточно-вытяжной вентиляцией во взрывобезопасном исполнении - соответствии с ГОСТ 12.1.004-91 [35];
- специальные помещения (для хранения в таре пылеобразной канифоли), изолированные от нагревательных приборов и нагретых частей оборудования;
- первичные средства пожаротушения на производственных участках (передвижные углекислые огнетушители ГОСТ 9230-77, пенные огнетушители ТУ 22-4720-80, ящики с песком, войлок, кошма или асбестовое полотно) [36];

- автоматические сигнализаторы (типа СВК-3 М 1) для сигнализации о присутствии в воздухе помещений предвзрывных концентраций горючих паров растворителей и их смесей.

Лаборатория полностью соответствует требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, порошковых огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления движения к запасному (эвакуационному) выходу [35].

4.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

4.5.1 Анализ типичной ЧС при проведении исследования

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – обстановка, сложившаяся на определенной территории в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которая может повлечь за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

При проведении исследования наиболее вероятной ЧС является пожар. Пожар в рабочем помещении может возникнуть вследствие причин неэлектрического и электрического характера. В таблице 29 рассмотрены возможные чрезвычайные ситуации, методы по их предотвращению и ликвидация их последствий.

Таблица 29 – Чрезвычайные ситуации, методы их предотвращения и ликвидации последствий

№	Чрезвычайная ситуация	Методы предотвращения ЧС	Ликвидация последствий ЧС
1	Пожар	Проведение вводного и повторного (через 6 мес.) инструктажа; Соблюдение технологических режимов производства; Создание условий эвакуации персонала	Вызов пожарной службы и спасателей (тел. 112); Вызов скорой медицинской помощи
2	Удар током	Проведение вводного и повторного (через 6 мес.) инструктажа; Содержание энергетических сетей в исправном состоянии	Вызов скорой медицинской помощи (тел. 030, 112); Оказание первой помощи
3	Травмирование в результате падения с высоты	Проведение вводного и повторного (через 6 мес.) инструктажа; Создание систем предупреждения падений; Соблюдать требования безопасности при выполнении работ на высоте	Вызов скорой медицинской помощи (тел. 030, 112); Оказание первой помощи

Выводы по разделу

В данной главе проведен анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований:

- 1) микроклимат [26];
- 2) шум и вибрация [29];
- 3) электромагнитное излучение [27];
- 4) освещенность [28];
- 5) психофизиологические факторы [30];
- 6) электробезопасность [31];
- 7) пожаро-взрывобезопасность [32].

Помещение №246 10 корпуса ТПУ отнесено:

- 1) по электробезопасности – к 2 классу [33];
- 2) по пожаро-взрывобезопасности – к категории В [35].

Также рассмотрены возможные чрезвычайные ситуации, методы их предотвращения и ликвидации последствий.

Выводы

1) На базе чертежей двухмерной модели из библиотеки ЛЯР ОИЯИ создана трехмерная компьютерная модель магнитной системы с учетом несимметрии центральной области циклотрона У400М, которая показывает, что размещение новых катушек ближе к центру магнита, позволит значительно сэкономить на технологических и экономических параметрах производства.

2) Проведен расчет магнитного поля основной обмотки электромагнита циклотрона У400М, который показывает, что изменение размеров и смещение центра масс новой обмотки по отношению к исходной изменяет радиальное распределение среднего магнитного поля, так при установке новых катушек радиальный наклон среднего магнитного поля изменится к среднему радиусу вывода $R=1.78\text{м}$ на величину до 75 Гс. в зависимости от уровня основного поля, что в свою очередь меняет условия изохронизма для рабочих режимов циклотрона.

3) Проведен сравнительный анализ полученных расчетных данных для 5 уровней тока возбуждения электромагнита и показано, что они имеют хорошую сходимость с результатами измерений, дают качественную картину поведения магнитного поля, позволяют оценить степень вносимых изменений при замене основной обмотки.

4) С целью подготовки результатов расчета магнитного поля для траекторного анализа рассмотрен способ настройки новых рабочих режимов циклотрона У400М, учитывающий компенсацию, возникающих изменений магнитного поля при замене основной обмотки электромагнита на основе подбора уровня магнитного поля и частоты ускоряющего напряжения.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученные при подготовке магистерской диссертации в ЛЯР ОИЯИ (г. Дубны), могут быть использованы в ходе реконструкции при замене основной обмотки циклотрона У400М

Список использованной литературы

1. Дж. Ливингуд «Принципы работы циклических ускорителей», 1961.
2. Коломенский А. А., Лебедев А. Н. «Теория циклических ускорителей», М, 1962
3. Гикал Б. Н. «Система аксиальной инжекции ионов в циклотрон У-200», Диссертация на соискание ученой степени, Дубна, 1989.
4. А. Р. Борисенко, «Транспортировка пучков заряженных частиц» (общий курс), Физика и техника ускорителей, Алматы, 2006.
5. T. Stambach "Introduction to cyclotrons", CAS, Vol 1, Geneva, 1994.
6. Техническое задание «TZD-DC280-02-05_ИМ-90».
7. <http://www.cobham.com/>.
8. Мешков И.Н., «Транспортировка пучков заряженных частиц», Новосибирск, Наука, 1991.
9. Гикал Б. Н., Дмитриев С. Н., Гульбекян Г. Г., Богомолов С.Л., Борисов О.Н., Бузмаков В. А., Иваненко И. А., Казаринов Н.Ю., Калагин И.В., Колесов И.В., Папаш А.И., Пащенко С.В., Тихомиров А.В., Хабаров М.В. «Циклотронный комплекс ДЦ-60 для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий», Сообщение ОИЯИ, Р9-2007-104, Дубна-2007.
10. Г.Н. Флеров. Синтез сверхтяжелых элементов и применение методов ядерной физики в смежных областях.// Вестник АН СССР, 1984, №4, С. 35-48.
11. Oganessian Yu. Ts., Gikal B.N., Gulbekian G.G. New possibilities on polymeric materials irradiation on U-400 heavy ion accelerator of LNR, JINR // Proceeding of the 2nd Meeting "Particle track membranes and their applications" 2

- 6th December 1991. Szczyrk, Poland. (Edited by W. Starosta, M. Buczkowski, Warsaw, 1992). С. 5-9.

12. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, С.Н.Дмитриев, С.Л.Богомолов, О.Н.Борисов, И.А.Иваненко, Н.Ю.Казаринов, В.И.Казаха, И.В.Калагин, И.В.Колесов, М.Н.Сазонов, А.В.Тихомиров, Й. Франко. Проект циклотрона тяжелых ионов DC-110 для промышленного применения и прикладных исследований в области нанотехнологий // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т.7. №7(163). С. 891-896.

13. Г.Н.Флеров, Ю.Ц.Оганесян, А.М.Андриянов, Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, А.И.Иваненко, Б.А.Кленин, С.И.Козлов, И.В.Колесов, В.Б.Кутнер, В.Н.Мельников, Р.Ц.Оганесян, В.А.Чугреев Разработка ускорительного комплекса У-400 и У-400М // Труды 10 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, октябрь 1986 г. Дубна, 1987. Сообщение ОИЯИ Д9-87-105. С. 109-114.

14. Ю.Ц.Оганесян, И.В.Колесов, Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, А.И.Иваненко, Б.А.Кленин, С.И.Козлов, В.Б.Кутнер, В.Н.Мельников, Р.Ц.Оганесян, К.И.Семин, В.А.Чугреев. Состояние работ по созданию циклотронного комплекса тяжелых ионов Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ // Труды 9-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, ОИЯИ, 1985. Т.1. С.47-53.

15. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, С.Н.Дмитриев, С.Л.Богомолов, А.А.Ефремов, И.А.Иваненко, В.И.Казаха, Н.Ю.Казаринов, И.В.Колесов, В.И.Миронов, В.Н.Мельников, А.В.Тихомиров. Модернизация циклического имплантатора ИЦ-100. Сообщение ОИЯИ, Р9-2003-121. Дубна, 2003. 18 с.

16. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, А.И.Иваненко. Исследование процесса перезарядки тяжелых ионов при их ускорении в циклотронах У-200, У-300 и У-400 // ЖТЭФ, 1984, т.54, вып.7, с.1288-1293; Препринт ОИЯИ Р9-83-451. Дубна, 1983. – 12 с.

17. B. Gikal, S.Dmitriev, G.Gulbekian, P. Apel'V. Bashevoi, S. Bogomolov, O. Borisov, V. Buzmakov A. Cherevatenko, A. Efremov, I. Ivanenko, O. Ivanov, N. Kazarinov, M.Khabarov, I. Kolesov, V.Mironov,A. Papash, S. Pashchenko, V. Skuratov, A. Tikhomirov, N. Jazvitsky. IC100 cyclotron based facility for production of nuclear filters as well as for scientific and applied research // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т.5. №7(149). С.140-147.

18. S.L.Bogomolov, V.B.Bekhterev, A.A.Efremov, B.N.Gikal, G.G.Gulbekyan, Yu.K.Kostyukhov, N.A.Lebedev, V.N. Loginov, Yu.Yazvitsky. Recent Development in ECR Ion Sources at FLNR JINR // Proceedings of RUPAC2012, Sant-Petersburg, Russia, 2012. P. 203-207.

19. Г.Г.Гульбекян,Э.Л.Иванов. Программа расчета неоднородных резонаторов и ускоряющих систем циклотронов У-400 и ИЦ-100. Сообщение ОИЯИ 9-87-495. Дубна, 1987. 9с.

20. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова,

21. Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова. – Томск: НИ ТПУ, 2014. – 73 с.

22. Кнышова Е. Н. Экономика организации: учебник / Е. Н. Кнышова, Е. Е. Панфилова. – Москва: Форум Инфра-М, 2012. – 334 с.: ил. – Профессиональное образование.

23. Шульмин В. А. Экономическое обоснование в дипломных проектах: учебное пособие для вузов / В. А. Шульмин, Т. С. Усынина. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 192 с.

24. Федеральный закон «Об основах охраны труда в Российской Федерации» от 17.07.99 №181 – ФЗ.

25. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы».

26. СанПиН 2.2.4.548-96. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».

27. ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности.

28. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий».

29. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Санитарные нормы «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки».

30. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».

31. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность.

32. ГОСТ 12.1.044-2018 ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов.

33. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.

34. СанПиН 1.2.3685-21 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

35. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность.

36. ГОСТ 9230-77 «Огнетушители CO_2 (углекислотные) передвижные».

Приложение А

Calculation of the magnetic field during the reconstruction of the main winding of the electromagnet of the cyclotron U400M

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM01	Басс Вадим Игоревич		

Консультант лингвист Отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Зеремская Юлия Александровна	к.филол.н.		

Introduction

The U-400M cyclotron is the basic experimental facility at the Laboratory of Nuclear Reactions named after G.N. Flerov of the Joint Institute for Nuclear Research. The U-400M cyclotron makes it possible to accelerate particles of various types with different ratios of the number of standard units of atomic mass to the number of elementary charges $A/Z = 2 - 10$ up to the energy of $80 - 5$ MeV/nucleon. Today, the reconstruction of the U-400M cyclotron is being carried out, the main purpose is to replace the main winding of the electromagnet, to measure and optimize the magnetic field in order to increase the efficiency of acceleration and extraction of charged particle beams from the cyclotron.

The presented work is devoted to the preparation and computational support of the ongoing reconstruction of the U-400M cyclotron and the aim of the work is to carry out three-dimensional calculations of the magnetic system of the cyclotron, to assess the effect of changes made when replacing the winding on the distribution of the magnetic field of the cyclotron.

The presented work consists of the following steps:

- Construction of a three-dimensional computer model of the U-400M cyclotron.
- Calculation of the magnetic field of the U-400M cyclotron in the cases of the original and new main winding of the electromagnet.
- Comparative analysis of the obtained results, determination of the way to compensate the obtained changes in the magnetic field of the cyclotron when replacing the main winding.
- Application of the results of magnetic field calculation for trajectory analysis, which is carried out at Flerov Laboratory of Nuclear Reactions.

1. Literature review

1.1. History of the development of cyclotrons

For the first time, the operating principle of a magnetic resonant accelerator - a cyclotron - was formulated almost 100 years ago. Due to its versatility, during this time a large number of nuclear reactions have been studied with the help of the cyclotron and ions of almost all chemical elements have been accelerated: from hydrogen to neon. Currently, the cyclotron is also the most common type of accelerator.

In 1919 Rutherford attempted to conduct an experiment to study atomic nuclei. He conducted experiments during which he collided nitrogen nuclei with α -particles emitted from a radioactive source. The device for the collision of nuclei was a brass chamber $18 \times 6 \times 2$ cm with a source of α -particles in the form of a metal disk coated with an active substance and placed inside the chamber, which was filled with various gases. In 1932, John Cockcroft and Ernest Walton first designed a special 800-kilovolt DC generator. They accelerated the protons and sent them to a lithium target. In the experiment, the particles gained energy by one-time passing through the region of high potential difference. This method is called the direct particle acceleration. Accelerators operating by this method are called linear accelerators [1].

In 1930, the first communication was received on the principle of a cyclic resonant accelerator without the use of ultrahigh voltage. Further, in 1931, Lawrence and M. Livingston accelerated molecular hydrogen ions on a cyclotron with a pole diameter of 100 mm for the first time. A year later, the same scientists accelerated deuterons to an energy of 3.6 MeV, using a more advanced setup. Particles move in a circle or spiral and repeatedly pass through accelerating gaps. Accelerators operating according to this method are called cyclic accelerators (Cyclotron).

1.2. The operating principle of cyclotrons

The cyclotron uses the method of cyclic acceleration of heavy ions. Heavy charged particles enter the vacuum chamber from the injector. The chamber is located between the poles of the electromagnet, and inside it there are electrodes, the so-called dees, which form accelerating gaps. An alternating electric field is applied to the dees. The electromagnet creates a uniform magnetic field perpendicular to the plane of the dees. The ion beam injected into the center of the cyclotron is captured in acceleration of the dees by the electric field, and with the help of the magnetic field, the beam trajectory has the form of an unwinding spiral. Thus, the particle enters the first dee and describes an arc whose radius is proportional to the particle's velocity. When leaving the first dee, the particle accelerates again, since the polarity of the voltage changes, and goes into the second dee. In it, it describes an arc of a larger radius. Further acceleration occurs in a similar way, the particle trajectory is shown in Figure 1. For normal operation of the accelerator, it is necessary to fulfill the condition of resonant acceleration: the high-frequency voltage applied to the dees must be equal to the ion revolution frequency. It is necessary for the particles to be in phase with the voltage and therefore they always accelerate when they enter into the electric field. The radius of a circular orbit is proportional to the momentum of the particle. When the radius of the orbit and the energy of the particle reach the maximum allowable values, the particle beam is removed from the cyclotron [2].

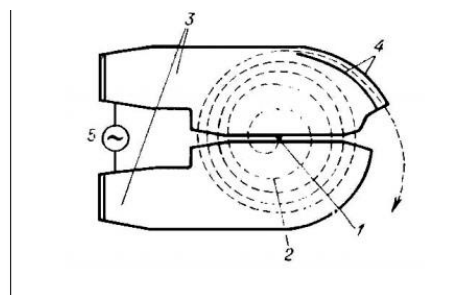


Figure 1 – Schematic diagram of the cyclotron: 1-ion source, 2- particle acceleration trajectory, 3-dees, 4-extracted beam, 5-alternating electric field.

1.3. Components of the cyclotron

The accelerator complex includes:

- magnetic system,
- high-frequency resonant system and high-frequency generator,
- vacuum chamber and high vacuum pumping system,
- ion source and beam injection system,
- beam diagnostics and correction system,
- beam extraction elements,
- two channels for transporting the beam of accelerated ions,
- chambers for physical experiments
- water cooling system,
- monitoring and control system, power supply.

Ion source

An integral part of the cyclotron is an ion source, a device for producing an ion beam in a vacuum. Atoms of accelerated elements are introduced into the ion source in two ways: by inlet (in the form of gas) or by evaporation (liquid or solid impurities). After that, they are ionized and, with the help of the potential, they are pulled into the accelerator, where they acquire the necessary energy. Ion sources should have the following characteristics: simplicity of restructuring from one accelerated element to another, beam stability over time, production of ions with a certain charge and mass, sufficient intensity of the required ions [3,4].

At the moment, there are many different ion sources. They can be classified according to: the principle of operation, the purpose, the working substance used and the charge of the ions produced in the source. Two types of sources are used in cyclotrons: internal and external.

The internal source is located at the center of the cyclotron. It is used to create the beams of protons (average current - up to 10 mA, pulsed current - up to 100 mA) and light ions (up to neon). Such sources include sources with a cold cathode.

In sources of an external type, it is possible to create highly charged ions, they are transported to the center of the cyclotron, where they are captured and accelerated. These sources include ECR sources.

Axial Beam Injection System

The U400M cyclotron is equipped with an external beam injection system and an ECR source of heavy ions, which makes it possible to obtain intense beams of multiply charged ions of most elements of D.I. Mendeleev.

The first system for transporting a beam from an external ion source to the center of a cyclotron was installed by Powell at the Birmingham cyclotron in 1962. The beam was focused in the injection line using a lens, and an electrostatic reflector was used at an angle of 45 degrees to turn the beam into a horizontal plane. The requirements for the transport system are determined by the emittance of the ion beam, which must be matched to the acceptance of the system. Four types of focusing elements can be selected for focusing:

- electrostatic lenses;
- electrostatic quadrupole lenses;
- magnetic lenses (solenoid);
- magnetic quadrupole lenses.

Each of these lens types has its own advantages and disadvantages.

Electrostatic lenses have the advantage of requiring little power. At the same time, there are problems with operation, particularly in relation to the dusting of insulators, since heavy ions produce sputtering of the material of the bombarded surfaces [3,5].

To create the condition for focal-parallel beam transfer, a focusing solenoid is used at the input of each analyzing magnet during injection into the center of the cyclotron.

Solenoids consist of the following parts: excitation winding, magnetic circuit (magnetic screen), current supply, water supply and the stand with a mechanical control of the position of the external solenoid.

The magnetic screen consists of two side cover plates and a cylindrical frame. The inner frame of the solenoid is a part of an ion-conducting tube made of non-magnetic stainless steel.

The excitation winding of the solenoid is powered by a DC source and consists of eight sectors wound with copper wire connected in series. The excitation winding is made of a square copper conductor with a cooling water channel.

The current lead is a block of terminal clamps, on which the current-carrying cables are connected to the output ends of the solenoid winding.

Magnetic lenses of the solenoid type carry out focusing actions by a longitudinal field, their effect on the beam is relatively weak, which leads to the creation of strong fields and consumption of large electrical power. The characteristic field on the lens axis is $\sim 2\text{--}5$ kG, power consumption is $2\text{--}7$ kW.

Magnetic quadrupole lenses have a strong effect on the beam, the power consumption is up to 1 kW. Their number should be twice as many as the solenoids.

When choosing focusing elements, it is necessary to take into account the scattered field in the axial channel of the magnet, which has a focusing effect on the beam.

For reliable operation of the accelerator in industrial conditions, a simple and reliable transportation system based on solenoid-type magnetic lenses, which has the smallest number of focusing elements and a short system setup time, is better suited.

As a rule, electrostatic optics is used to form the beam emerging from the ion source [6].

Correction magnets must be provided in the axial injection system to correct beam deviations from the axis caused by the influence of the scattered field of the cyclotron magnet and other factors.

The analyzing magnet is an element of the axial injection system, which performs the function of ions analysis by charge with beam separation for acceleration. The analyzing magnet is also used to rotate the beam by 90 degrees into the axial injection channel. To keep the beam symmetrical after rotation, the magnet uses edge focusing.

A buncher is used to group the beam. A buncher is a device that splits a continuous beam of charged particles into separate bunches or increases the degree of grouping in the beam (compresses bunches). The buncher is located in the axial injection channel on the beam trajectory and creates an high-frequency electric field, which, depending on the phase of the cyclotron accelerating high-frequency field, slows down or accelerates the particles so that at the buncher outlet they gather into compact bunches in phase coinciding with the beam acceleration period in the dees.

The ion-optical system ensures beam transportation with minimum losses and matching of the parameters of the injected beams with the acceptance of the inflector.

The inflector rotates the injected beam from the axial channel into the median plane of the cyclotron.

There are three main types of deflectors:

1. Electrostatic mirror.

An electrostatic mirror consists of an upper electrode in the form of a grid, which is at zero potential, and a lower electrode, which is under a positive potential equal to the injection voltage.

2. Hyperbolic inflector.

The inflector electrodes are two concentric planes formed by the rotation of hyperbolas around the Z axis parallel to the magnetic field vector.

3. Spiral inflector.

In a spiral inflector, the electric field at each point of the trajectory is directed perpendicular to the particle velocity. This type of inflector is similar to a cylindrical deflector, but it takes into account the action of the magnetic field, which is directed parallel to the particle velocity at the input, and perpendicular at the output.

The magnetic system of the cyclotron

It consists of a yoke, elements of the working area, excitation winding, azimuthal, radial and corrective coils.

The magnet is one of the largest and heaviest parts of the cyclotron. Therefore, it is often made from prefabricated structures. In addition, this enables parallel and alignment adjustment of the pole pieces. There are several types of accelerator magnets.

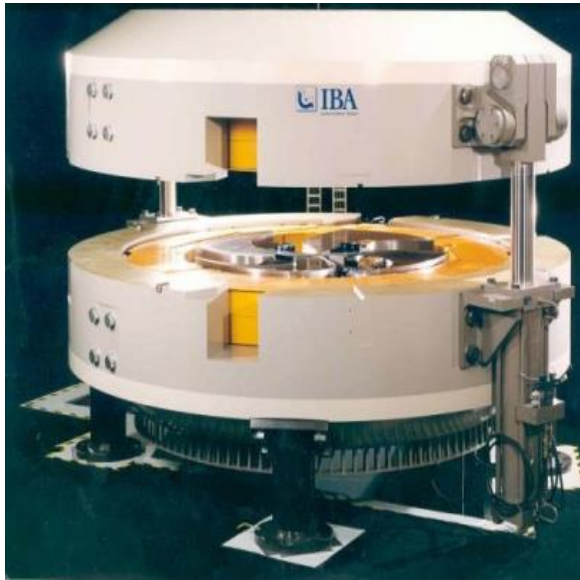
1) W-shaped magnets:



Figure 2 – U-400 cyclotron. Laboratory of Nuclear Reactions named after G.N. Flerov, JINR

W-shaped magnets consist of lower and upper horizontal beams and two vertical posts. The lower and upper cylindrical poles are fixed on the beams (Figure 2).

2) Armor type magnets:



(a)



(b)

Figure 3 – Isochoric cyclotron for proton therapy with an armored magnet, Belgium. (a). Cyclotron SS MSS 30/15 (b)

The working area in such a magnet is located inside the armored yoke.

3) Magnets with divided sectors:

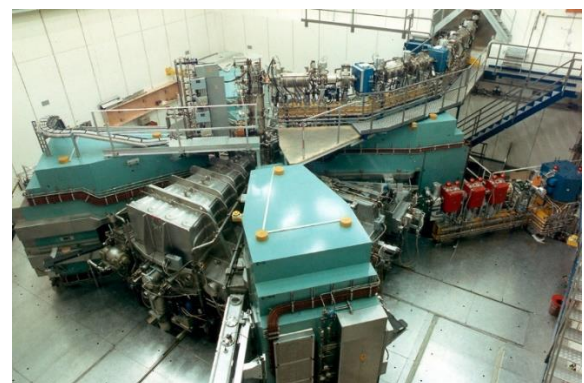


Figure 4 – Magnets with divided sectors at the Paul Scherrer Institute in Switzerland. The magnetic system consists of separate magnets. Such magnets are divided into two types: radial sector and spiral sector.

Formation of cyclotron magnetic field

To ensure the required distribution of the magnetic field in the working area, it is necessary to use shims. The shim is a special part made of magnetic material. They are positioned so that their influence, together with the main magnet, achieves the required configuration of the magnetic field [1,4].

1. Excitation windings

Excitation windings are used to create a magnetic field. There are two types of them: “warm” and superconducting.

2. Correction coils

Correction coils are used for operational correction of the magnetic field of the cyclotron and are divided into two types: radial and azimuthal.

Azimuth correction coils compensate for unwanted harmonics in the azimuth field distribution and control the amount of flutter.

Radial correction coils change and regulate the average magnetic field of the cyclotron in order to maintain the isochronism of particle motion

Beam extraction system

The extraction system makes it possible to deflect the beam from the acceleration zone and direct it into the ion guide. In this case, it is necessary to ensure a good quality of the beam at the output of the accelerator for the efficient transportation to physical facilities.

The beam extraction system of the heavy ion cyclotron is based on two methods:

1. the method of recharging ions on a thin foil,
2. electrostatic output.

The method for extracting an ion beam from a cyclotron with an azimuthal variation of the magnetic field was proposed by G.N. Flerov and Yu.Ts. Oganessian and G.N. Vyalov in 1964. For many years, it has been used in U-200, U-400, U400M cyclotrons at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, and has shown high reliability. One of the limitations in using this method is the lifetime of the rechargeable foil. Various materials and foil production technologies were tested in the accelerators of the laboratory. Carbon foils with a thickness of 20–100 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ proved to be the best in the work. In the manufacture of foil, it is important to obtain a high deposition density without the admixture of by-products. The life time of the foil essentially depends on the mass and energy of the ions, as well as on the production technology [8].

The extraction system using an electrostatic deflector makes it possible to deflect the beam from the acceleration zone with the help of an electric field and direct it to the ion guide. A deflector is a device that creates static electric or magnetic fields that deflect a beam. After passing the beam through the extraction system, it is focused using edge-focusing magnets, quadrupole high-focusing magnets, or a combination of both.

The focusing magnetic channel (MC) is located in the zone of the maximum gradient of the falling magnetic field of the cyclotron, which is (30-35) T/m at the edge of the sector. The magnetic channel is used to compensate for the defocusing effect of the falling field and to form the size and emittance of the beam at the entrance to the ion guide, matched to the acceptance of the transport channel.

Elements of beam diagnostics:

- An output probe is located between the deflector and the magnetic channel and helps to optimize the position of the deflector and the magnetic channel;
- Profiler and luminophor are located in the outlet pipe at the outlet of the vacuum chamber and helps to determine the shape and intensity of the extracted beam.

Vacuum cyclotron system

Accelerator complexes can be divided into four main systems with the corresponding requirements for the vacuum system:

- ion source with axial injection channel,
- vacuum chamber of the cyclotron,
- channels for transporting accelerated ion beams, including physical facilities

The vacuum chamber of the accelerator is connected to the ion ducts of the axial beam injection channels, channels of low and high energy ion beams, which are made of stainless pipes.

The vacuum system of the axial injection complex and the low-energy beam channel should provide a pressure in the ion guide of about $1 \cdot 10^{-7}$ Torr. One of the most important factors determining the choice of high-vacuum equipment and the location of pumping facilities is the conductivity of the ion guide. The conductivity of the area where the vacuum pump is connected to the ion duct must be higher than the nominal pumping speed of the pump, so that the effective performance of the pump is not significantly inferior to its nominal performance [9,10].

The channels for transporting the extracted high-energy beams consist of diagnostic units and an ion duct - a stainless steel tube with a diameter of 100 mm. The vacuum system of channels should provide a vacuum, according to the calculation, no worse than 10^{-7} Torr.

Channel preparation is carried out in 2 stages:

- Fore-vacuum pumping of the channels to a pressure $P \leq 5 \cdot 10^{-2}$ Torr.
- High-vacuum pumping of the channels is done by turbopumps.

High frequency accelerating system

Ions are accelerated in the cyclotron using a high-frequency electric field created on accelerating electrodes (dees). The frequency of the accelerating field is

a multiple of the particle revolution frequency in the cyclotron. Typical amplitude voltage on the dees of heavy ion cyclotrons for industrial use is 50-60 kV.

In cyclotrons developed at Flerov Laboratory of Nuclear Reactions for applied problems, the resonant accelerating system consists of the following main units:

- Four diametrically opposed quarter-wave coaxial resonators - steel tanks clad inside with oxygen-free copper, and copper rods that turn into dees;
- A shorting copper plate with pressure ball contacts used to change the frequency of the resonators;
- Communication loop that transfers high frequency energy from the generator to the resonant system;
- Trimmers for fine adjustment of the resonant frequency;
- Pickup electrodes and measuring loops for voltage measurement on dees.

A high-frequency system is necessary to supply the dees (accelerating electrode) with the appropriate voltage. With its help, the particle receives the necessary energy for acceleration. The high-frequency system consists of three main parts: dees, resonator, generator and a line connecting them.



Figure 5 – Photograph of the high-frequency accelerator system of the cyclotron

To reduce particle losses during acceleration in heavy ion cyclotrons, it is necessary to have a vacuum in the cyclotron chamber of $\sim 10^{-7}$ Torr. To reduce gas separation from the surface of the resonators, the technology of manufacturing resonators made of stainless steel and clad inside with oxygen-free copper by diffusion welding was used. The thickness of the copper plating is 6 mm. Inside the tank there are guides for moving the shorting plate. During the operation of the high-frequency accelerator, loop currents heat the tank plating, and therefore channels are welded on the outer side of the resonator along the entire length of the tank, forming cooling circuits [1,9].



Figure 6 – Image of the dee

Dees (Figure 6) consist of the following basic units: frame, cladding with cooling tubes, puller. The upper and lower claddings of the dees are attached to the frames with titanium screws. The frames, in turn, are attached to the spherical part of the stem. A puller is installed in the "bow" part of the dees. Poolers of opposite dees are interconnected by a copper contact jumper if a connected dee circuit is used. For reliable fixation and adjustment of the dees inside the cyclotron chamber in the longitudinal, transverse and vertical directions, a rod support with an adjustment mechanism is designed.

References

1. J. Livingood "Principles of operation of cyclic accelerators", 1961.
2. Kolomenskiy A. A., Lebedev A. N. "Theory of cyclic accelerators", M, 1962
3. Gikal B. N. "The system of axial injection of ions into the cyclotron U-200", Dissertation for the degree, Dubna, 1989.
4. A. R. Borisenko, "Transportation of charged particle beams" (general course), Physics and technology of accelerators, Almaty, 2006.
5. T. Stambakh "Introduction in Cyclotrons", CAS, Volume 1, Geneva, 1194.
6. Technical specification "TZD-DC280-02-05_IM-90".
7. Meshkov I.N., "Transportation of charged particle beams", Novosibirsk, Nauka, 1991.
8. Gikal B. N., Dmitriev S. N., Gulbekyan G. G., Bogomolov S.L., Borisov O.N., Buzmakov V. A., Ivanenko I. A., Kazarinov N.Yu., Kalagin I.V., Kolesov I.V., Papash A.I., Pashchenko S.V., Tikhomirov A.V., Khabarov M.V. "Cyclotron compels DC-60 for scientific and applied research and industrial applications in the field of nanotechnology", JINR Report, P9-2007-104, Dubna-2007.
9. G.N. Fleurov. Synthesis of superheavy elements and application of nuclear physics methods in related fields.// Bulletin of the USSR Academy of Sciences, 1984, No. 4, pp. 35-48.
10. Oganesyan Yu.Ts., Gikal B.N., Gulbekyan G.G. New possibilities of irradiation of polymer materials at the heavy ion accelerator U-400 LNR, JINR // Materials of the 2nd meeting "Membranes for particle tracking and their application" December 2-6 1991. Schirk, Poland. (Edited by V. Starosta, M. Buczkowski, Warsaw, 1992). pp. 5-9.