

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ им. В.П. ДЖЕЛЕПОВА

На правах рукописи



ГУРСКИЙ
Семен Владимирович

РЕЗОНАТОРЫ УСКОРЯЮЩИХ СИСТЕМ ИЗОХРОННЫХ
ЦИКЛОТРОНОВ ДЛЯ ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ

Специальность 1.3.18 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная
техника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна – 2025

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Джелепова
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель — ***Карамышев Олег Владимирович,***
кандидат физико-математических наук

Официальные оппоненты — ***Иванов Валентин Яковлевич,***
доктор физико-математических наук, старший
научный сотрудник Института ядерной физики
имени Г.И. Будкера СО РАН

Гаврилов Сергей Александрович,
кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией пучка отдела
ускорительного комплекса Института ядерных
исследований Российской академии наук

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте
Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной
сети «Интернет» по адресу: [http://
dissertations.jinr.ru/ru/Councils/NuclearPhysicsCouncil/dissertations](http://dissertations.jinr.ru/ru/Councils/NuclearPhysicsCouncil/dissertations). С печатной версией
диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ
(г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного
совета ОИЯИ по ядерной физике
ОИЯИ.03.01.2022.П

доктор физико-математических наук

Г.А. Карамышева

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В современной клинической практике успешно используется метод адронной лучевой терапии, представляющий собой эффективное направление в рамках радиационной онкологии. Данная методика применяется для лечения пациентов, страдающих от онкологических заболеваний различных локализаций. В России годовой спрос на данное лечение составляет около пятидесяти тысяч пациентов. В мире функционирует приблизительно семьдесят центров адронной лучевой терапии, оснащенных протонными и ионными ускорителями, как в рамках медицинских, так и исследовательских учреждений. По состоянию на настоящий момент, более 150 тысяч пациентов прошли лечение с использованием данного метода, что способствовало накоплению значительного объема клинического опыта в применении адронной лучевой терапии [1].

В ОИЯИ научно-исследовательский центр протонной терапии заработал первым в России. Синхроциклотрон (ОИЯИ, Фазотрон) с энергией протонов 660 МэВ и током до 3 мкА использовался для лечения с 1967 года [2], в медико-техническом комплексе проводились сеансы с пропускной способностью до 100 пациентов в год [3].

Длительный клинический опыт в лечении пациентов с онкологическими заболеваниями при помощи протонных пучков в медико-техническом комплексе (МТК) ЛЯП ОИЯИ способствует формированию особых предпосылок для создания новаторских методов в области протонной терапии. Последние исследования нового многообещающего метода Флэш [4] показали его огромные перспективы для расширения применения протонной терапии на опухоли, ранее не поддающиеся лечению протонами, а также для существенного улучшения качества лечения. Флэш метод приводит к снижению количества процедур облучения, а, следовательно, к снижению цены лечения, делая его доступным для рядового больного. Для исследования метода имеется необходимое оборудование

медицинского пучка МТК ЛЯП, обеспечивающее возможность конформного облучения опухолей. Задача исследования Флэш определяет актуальность создания научно-исследовательского инновационного центра, оснащенного современным протонным ускорителем, системой доставки пучка и лабораторным оборудованием для медико-биологических исследований. Новый циклотрон MSC230 будет использоваться для дальнейших исследований и лечения методом протонной терапии.

На основе ускорителя протонов MSC230 будет создан международный медико-биологический инновационный центр в ЛЯП ОИЯИ для:

1. Проведения фундаментальных и прикладных разработок в области радиационной биологии и медицины, прежде всего методики Флэш на базе методик конформного облучения медицинского пучка МТК ЛЯП;
2. Подготовки и повышения квалификации специалистов в области радиационной биологии и медицины;
3. Создания условий для внедрения новейших технологий в области протонной терапии онкологических заболеваний в клиническую практику [5].

На ближайшие годы планируется выполнить первую задачу, а именно создать циклотрон и разработать оборудование для изучения методики Флэш облучения.

В разработке систем циклотрона MSC230 авторы проекта опирались на опыт, приобретенный при проведении расчетно-теоретических и пусконаладочных работ циклотрона C235 бельгийской компании IBA [27], а также на опыт по проектированию циклотрона SC200 [23] совместно с ASIPP (Институт Физики Плазмы китайской Академии Наук).

Цели и задачи. Целью работы является проектирование и создание высокочастотных систем ускорителей (C235, SC200, MSC230). Эти цели охватывали следующие направления работы автора:

- 1) Компьютерное моделирование ВЧ резонатора C235
- 2) Расчет ВЧ резонатора

- 3) Сборка, настройка и запуск ВЧ системы циклотрона С235 в процессе пуско-наладочных работ
- 4) Компьютерное моделирование ВЧ резонатора SC200
- 5) Расчет ВЧ резонатора SC200 - поиск рабочих характеристик и сравнение с результатами измерений
- 6) Создание трехмерной параметрической модели резонатора MSC230
- 7) Оптимизация расчетной сетки
- 8) Создание новой методики расчета поиска рабочих характеристик резонатора MSC230 на основе перебора переменных параметрической модели
- 9) Расчет, проектирование и оптимизация системы охлаждения ускоряющей системы MSC230
- 10) Расчет индуктивной петли связи
- 11) Подготовка технического задания на производство ускоряющей системы циклотрона MSC230

Научная новизна работы. На основе разработанной автором оптимизированной трехмерной модели резонатора циклотрона SC200 изготовлена его физическая модель.

Разработана новая комплексная методика проектирования резонаторов на основе метода перебора переменных параметризированной трехмерной модели.

Результаты работы. В представленной диссертационной работе подробно описываются результаты работы автора над ускоряющими системами трёх изохронных циклотронов, каждая из которых обладает своими особенностями и преимуществами:

1. Изохронный циклотрон С235-V3 (ИВА-Дубна):

Создана трехмерная модель резонатора и произведен компьютерный расчет по поиску собственных частот, добротности и распределения напряжения вдоль радиуса. Результат компьютерной симуляции показал соответствие результатов как с расчетом бельгийских коллег, так и с характеристиками резонатора серийной машины: получена рабочая частоты 106.2 МГц, рост ускоряющего напряжения вдоль радиуса от 60 до 120 кВ, величина добротности составила 10852.

Получена карта распределения напряженности электрического поля, вклад которой необходимо было учесть при моделировании динамики пучка в процессе усовершенствования магнитной структуры циклотрона.

2. Изохронный циклотрон со сверхпроводящей обмоткой SC200 (China-JINR):

Впервые создана трехмерная компьютерная модель с оптимизированными рабочими параметрами: собственной частотой, максимально возможным значением добротности и требуемым распределением напряжения вдоль радиуса. Результаты расчета согласуются с результатами расчета китайских коллег, что подтверждено рекомендательным письмом, ознакомиться с которым можно в приложении.

На основе трехмерной компьютерной модели были определены характерные параметры радиочастотного резонатора (собственный режим на рабочей частоте 91.5 МГц, значение добротности составило около 6200, что соответствует проектным требованиям) и создана физическая модель резонатора. Были достигнуты значения напряжения 60 кВ в центре и 120 кВ в зоне вывода.

Проведен компьютерный анализ системы подстройки для покрытия резонансной частоты 91.5 МГц с полосой пропускания ± 1 МГц, а диапазон регулировки частоты составляет 88,8 МГц $\sim$ 91,8 МГц.

На момент написания диссертации на циклотроне SC200 в Хефее (Китай) пучок был выведен, циклотрон находился в режиме стабильной работы в течение 600 часов. Ускоряющая система работает при параметрах, близких к проектным, создавая расчетное ускоряющее напряжение.

3. Циклотрон MSC230 (JINR):

Автор разработал новую методику моделирования и расчета резонаторов. Создал трехмерную параметрическую модель резонатора, оптимизировал его геометрию и провел компьютерную симуляцию при помощи новой методики расчета.

Спроектировал систему охлаждения: используя результаты расчетов электромагнитного поля внутри резонатора, произвел оценку нагрева его узлов, смоделировал контуры охлаждения и провел термический компьютерный анализ.

Это позволило оптимизировать процесс распределения тепла и значительно снизить результирующий нагрев, что, в свою очередь, обеспечит стабильность работы ускоряющей системы.

Провел компьютерный расчет индуктивной петли связи: определил ее геометрические размеры (площадь) с возможностью подстройки для согласованной передачи полной мощности в резонатор.

Результаты работы демонстрируют значительный прогресс в разработке компактных и эффективных ускоряющих систем, способных обеспечить ускорение пучка до требуемой энергии.

Практическая значимость. Циклотрон С235 успешно функционирует в городе Димитровграде: только за восемь месяцев 2021 года высокотехнологичную помощь в рамках одного медицинского центра получило более тысячи онкологических пациентов [6]. Сборка, настройка и запуск циклотрона проводились в Дубне, при тестах с пучком ускоритель показал корректную работу.

Циклотрон SC200 изготовлен, получен выведенный пучок. Интенсивность внутреннего пучка около 400 нА. При создании ускорителя были оттестированы все основные системы, а также линия транспортировки пучка и гантри. Запуск опытного образца SC 200 положил начало серийному производству циклотронов с энергией 240 МэВ.

Циклотрон MSC230 находится на стадии проектирования и будет работать в инновационном центре ЛЯП ОИЯИ для медико-биологических исследований.

Достоверность. Автор участвовал в сборочных и пуско-наладочных работах, и при этом лично убедился в том, что реальные характеристики резонатора соответствуют проведенным расчетам. Опираясь на опыт расчета резонатора С235-V3 и С400 [29] в дальнейшем, проводилось моделирование резонаторов SC200 и MSC230 с использованием тех же, но уже усовершенствованных, методик. Достоверность определена успешной работой ускорителя С235 в Димитровграде и пуском SC200.

Положения, выносимые на защиту:

- Оптимизированная компьютерная модель резонатора циклотрона SC200, на основе которой были изготовлены ускоряющие резонаторы. При расчете автор получил рабочие параметры: собственную частоту, максимально возможное значение добротности и требуемое распределение напряжения вдоль радиуса.
- Новая методика проектирования резонаторов: применен метод расчета характеристик резонаторов, основанный на переборе переменных, заданных в параметрической модели. Этот метод отличается от традиционных подходов, обеспечивая более быстрое и точное определение характеристик.
- Модель резонатора MSC230, обладающего необходимыми для ускорения пучка характеристиками: рабочей частотой 106,5 МГц, высокой добротностью 11200 и напряжением, растущим от центра к радиусу вывода с коэффициентом порядка двух.
- Спроектирована система охлаждения резонатора циклотрона MSC230, основанная на результатах расчета прямого импорта распределения потерь на поверхности резонатора в тепловой расчетчик CST. Это позволило оптимизировать процесс распределения тепла и значительно снизить результирующий нагрев, что, в свою очередь, обеспечит стабильность работы ускоряющей системы.
- Результат расчета индуктивной петли связи резонатора циклотрона MSC230 с оптимизированными размерами и положением, обеспечивающими хорошее согласование.

В каждом из этих пунктов новизна заключается в использовании современных методов, подходов и расчетов, которые позволили получить новые данные и улучшить характеристики исследуемых объектов.

Апробация работы. Результаты, вошедшие в диссертационную работу, докладывались автором на молодежных конференциях ОМУС, семинарах ЛЯП, международных семинарах по проблемам ускорителей заряженных частиц, посвященных памяти В.П. Саранцева, а также международных совещаниях в рамках проектов.

Данные работы, были поддержаны грантами ОИЯИ для молодых ученых и специалистов в 2015 и 2018 годах. В 2008 г. на конференции ОМУС и на V ежегодной научной конференции молодых ученых и специалистов Алушта-2016 доклад автора был выделен, как лучший доклад в секции ускорителей.

Публикации. По результатам диссертации в соавторстве оформлен один патент [14] на изобретение, опубликовано четыре статьи в реферируемых журналах [17][27][29][30], и двенадцать статей в трудах международных конференций.

Личный вклад автора. Все результаты, приведенные в работе, получены самим автором или при его непосредственном участии. Автор принимал участие в сборке, настройке, отладке и запуске ускорителя С235, предназначенного для Федерального высокотехнологичного центра медицинской радиологии ФМБА России города Димитровград [28]. Автор занимался созданием компьютерных моделей ВЧ резонаторов изохронных циклотронов С235, SC200, MSC230, их симуляцией и анализом результатов для достижения требуемых условий для успешного ускорения и вывода пучка с необходимыми характеристиками. В соавторстве было подготовлено ТЗ по ускоряющей системе циклотрона MSC230.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, списка сокращений и условных обозначений. Общий объем диссертации – 147 страниц, включая 105 рисунков и 12 таблиц. Список литературы содержит 52 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели, задачи и научная новизна работы, описывается ее практическая значимость.

В первой главе описываются принципы лечения протонами и актуальность протонной терапии в современном мире, обзор действующих протонных центров в мире и в России и особенности ускоряющих систем изохронных циклотронов.

Вторая глава посвящена медицинскому циклотрону ОИЯИ-IBA C235-V3. Во время сотрудничества при создании первого госпитального центра протонной терапии в России, расположенного в городе Димитровграде сотрудники ОИЯИ и Бельгийской компании Ion Beam Application (IBA) в период с 2011 по 2012 год провели сборку, формирование магнитного поля и испытания пучков на циклотроне C235-V3 в Дубне. По своим характеристикам он превзошел аналогичные медицинские циклотроны IBA, уже установленные в 11 госпитальных онкологических центрах в разных странах [7]. В процессе пуско-наладочных работ циклотрона C235-V3 для Димитровграда автор принимал участие не только в наладке ускоряющей системы, но и в сборке других систем ускорителей.

Дано общее описание изохронного циклотрона C235, приведены общие параметры основных систем ускорителя. Более детально представлена высокочастотная система: приведена схема усиления сигнала, описана работа системы LLRF, регулировка напряжения на дуанте, настройка резонатора. Приведены компьютерные расчеты резонатора в программе CST MWS [8], где автор убедился в соответствии результатов расчетных параметров и параметров действующего резонатора. На Рис. 1 показан график зависимости ускоряющего напряжения от радиуса. Красная и синяя линия (результат автора) соответствуют внутренней и внешней стороне резонатора, соответственно. Оранжевая и зеленая – результат сотрудников IBA. Опыт работ над ускоряющей системой был применен в последующих разработках циклотронов SC200 (Глава 3) и MSC230 (Глава 4).

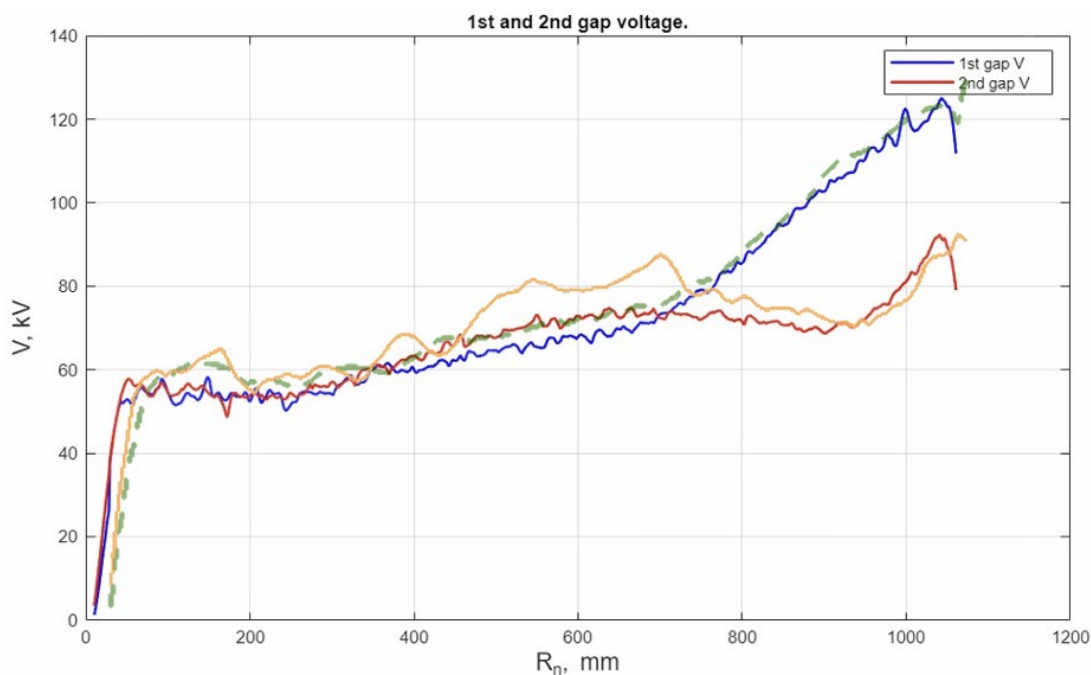


Рис. 1 Зависимость ускоряющего напряжения от радиуса

В третьей главе представлено описание изохронного циклотрона SC200, приведены общие параметры основных систем ускорителя. Детально описана высокочастотная система, приведены компьютерные расчеты резонатора в программе CST MWS, результаты сравнения с экспериментально измеренными параметрами показали хорошее соответствие с расчетными данными.

SC200 — это компактный циклотрон со сверхпроводящей обмоткой, разработанный для протонной терапии в сотрудничестве ASIPP (Хэфэй, Китай) и ОИЯИ (Дубна, Россия). Ускорение протонов происходит до энергии 200 МэВ с максимальным током пучка порядка 400 нА. Наличие высокого среднего магнитного поля в 2,9 Тл (в центре) -3,5 Тл (на выводе) [11] усложняет конструкцию радиочастотной (ВЧ) системы из-за необходимости создания секторов с высокой спиральностью. Согласно анализу магнитного поля и динамике пучка орбитальная частота протонов равна ~45 МГц. Радиочастотная система работает на частоте ~91.5 МГц. Два ВЧ-резонатора расположены в долинах секторов и соединены друг с другом в центре. Для достижения и поддержки требуемой частоты со стабильностью амплитуды 0.2% и фазовой стабильностью

0.1 градус используется LLRF система. Расчет и моделирование ускоряющей системы показали оптимальные результаты для обеспечения необходимой частоты ВЧ-резонаторов и роста ускоряющего напряжения вдоль радиуса [25][11].

ВЧ - резонатор является важным и сложным компонентом ускорителя. ВЧ-резонатор создает необходимое напряжение между дуантом и противодуантной рамкой для непрерывного ускорения протонов. Величина напряжения в ускоряющем зазоре в центре составляет около 60 кВ и 120 кВ на радиусе вывода. Резонатор состоит из стем, дуантов, тюнера, петли связи и корпуса. В Таблице 1 приведены технические параметры резонатора.

Таблица 1 Технические параметры резонатора SC200

Параметр	Значение
Высота резонатора	500 мм
Радиус вывода	1280 мм
Частота	91.5 МГц (2 гармоника)
Количество резонаторов	2
Мощность	~ 100 кВт
Тип резонатора	$\lambda/2$ коаксиальный
Ускоряющее напряжение	60 кВ (центр) ~120 кВ (вывод)
Азимутальная протяженность дуанта	40°
Азимутальная протяженность резонатора	50°
Азимутальная протяженность ускоряющего зазора	7°

Из-за требований к формированию магнитного поля циклотрона (для обеспечения вертикальной фокусировки пучка необходима высокая спиральность секторов), и именно поэтому создание резонатора компактного размера было непростой задачей.

Резонатор циклотрона SC200 представляет собой полуволновой коаксиальный резонатор с одной опорой - стемой. Он оснащен четырьмя емкостными тюнерами (элементами подстройки частоты) и индуктивной петлей связи. Резонансная частота может быть подстроена при помощи тюнеров.

Любое проектирование резонансной системы начинается с необходимости обеспечить частоту колебаний и рост напряжения вдоль радиуса и убедиться, что распределение поля обеспечивает ускорение пучка. Настройка частоты – зависит от предпочтений ВЧ инженера, но обеспечить изначально близкую частоту – задача проектирующего.

Резонансная частота (f) и добротность (Q) являются важными характерными параметрами для описания характеристик ВЧ резонатора.

Функция ВЧ резонатора заключается в создании высокочастотного электрического поля в зазоре между электродом и “землей”. При каждом обороте протон пересекает ускоряющий зазор и ускоряется электрическим полем. Поэтому крайне важно проанализировать распределение напряжения на дуантах. Ускоряющее напряжение (см. Рис. 2) было получено путем интегрирования вектора напряженности электрического поля в ускоряющем зазоре на фиксированных радиусах по дуге окружности.

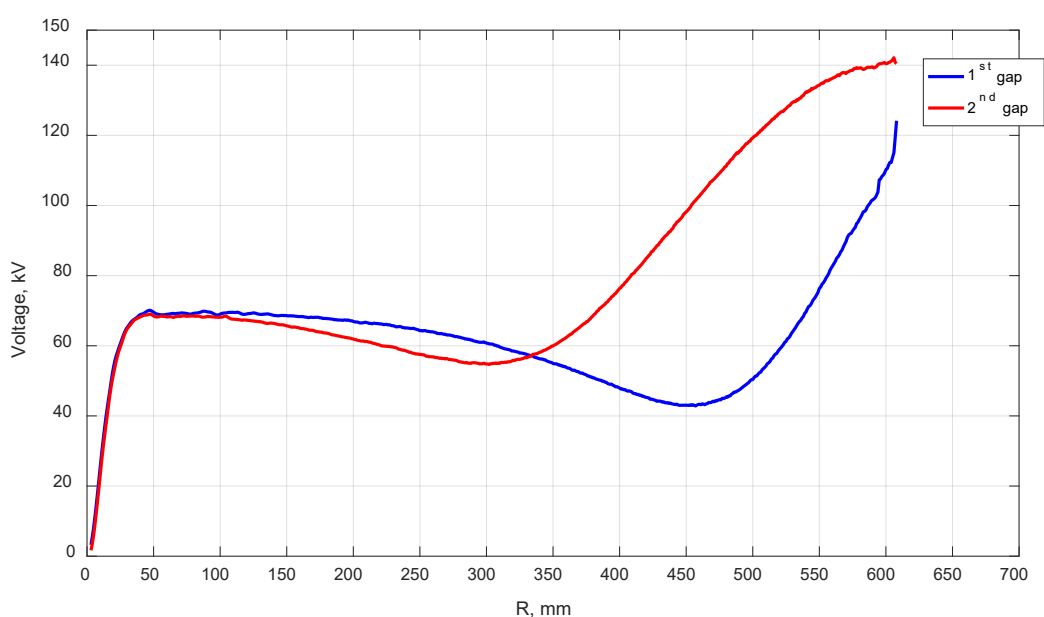


Рис. 2 Распределение ускоряющего напряжения вдоль радиуса.

Проведен физический эксперимент по измерению распределения напряжения вдоль радиуса. На рисунке ниже можно видеть сравнение компьютерного расчета и измерения.

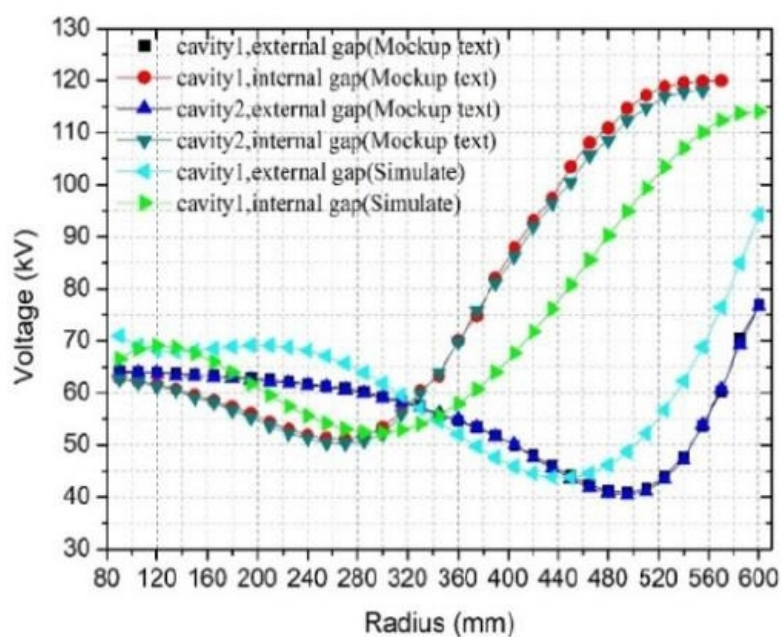


Рис. 3 Сравнение компьютерного расчета и физического измерения распределения напряжения электрического поля [11].

Трехмерные карты компонент электрического поля в медианной плоскости (см. Рис. 4) в дальнейшем были использованы для расчета динамики пучка.

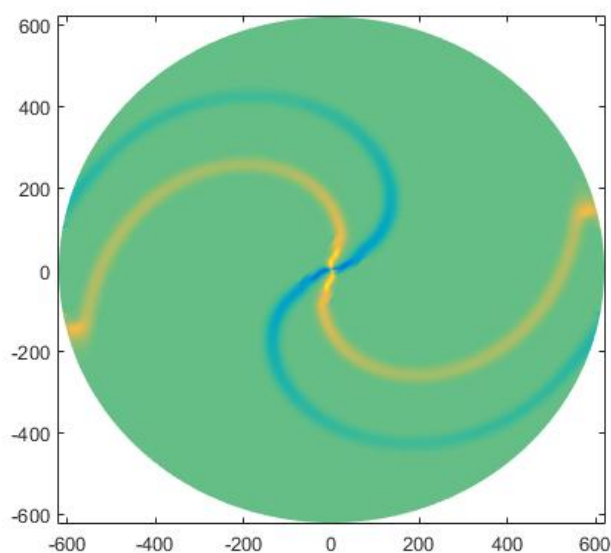


Рис. 4 Азимутальная компонента электрического поля в медианной плоскости

Результаты компьютерных расчетов резонатора:

- Частота 91.7672084 МГц

- Запасенная энергия 1 Джоуль
- Потери мощности для двух радиочастотных резонаторов около 84 кВт при ускоряющем напряжении в центре порядка 60 кВ. Распределение потерь мощности в резонаторе можно увидеть в Таблице 2.
- Добротность 6 231,6.

Таблица 2 Распределение потерь мощности в резонаторе

Узел	Потери, кВт	Соотношение, %
Стемы	21.06	25.01
Дуант	34.33	40.77
Плакировка резонатора	28.59	33.96
Петля связи	0.1516	0.18
Общее	84.2	\

На момент написания диссертации пучок был выведен, циклотрон находился в режиме стабильной работы в течение 600 часов.

В четвертой главе дано общее описание изохронного циклотрона MSC-230, приведены общие параметры основных систем ускорителя. Более детально описана высокочастотная система, описаны требования к высокочастотной системе для ее производства в НИИЭФА, создана трехмерная параметрическая модель в программе Solidworks [12], приведены результаты компьютерных расчетов резонатора в программе CST Studio Suite и Solidworks.

MSC230 представляет собой изохронный четырехсекторный компактный циклотрон с величиной магнитного поля в центре 1,7 Тл. Сверхпроводящие катушки заключены в криостат, все остальные части циклотрона “теплые”. Ускорение происходит на четвертой кратности частоты ускоряющей системы (четыре резонатора, расположенных в долинах циклотрона). В ускорителе планируется использовать внутренний источник ионов типа PIG с горячим катодом. Пучок будет выведен при помощи электростатического дефлектора,

расположенного в зазоре между секторами и двумя пассивными магнитными каналами [17].

Изохронный циклотрон MSC230 будет использоваться для дальнейших медико-биологических исследований и лечения пациентов. Основные параметры циклотрона MSC230 представлены в Таблице 3.

Таблица 3 Параметры циклотрона MSC230

Тип магнита	СП обмотка, “теплое” ярмо
Конечная энергия, МэВ	230
Среднее магнитное поле (центр/вывод), Тл	1.7/2.15
Габариты (высота × ширина), м	1.7×3.5
Вес магнита, тонн	120
Зазор холма / долины, мм	50/700
Число ампер-витков	280000
Вес СП обмотки, кг	170
Плотность тока в обмотке, А/см ²	90
Частота ВЧ-системы, МГц	106.5
Кратность ускорения	4
Количество ускоряющих резонаторов	4
Напряжение центр-зона вывода, кВ	40/100
Мощность ВЧ-системы, кВт	60
Радиус вывода, мм	1070
Количество оборотов	500
Интенсивность пучка, мкА	1.0
Тип системы вывода	ЭСД+2МК

Ускоряющая высокочастотная (ВЧ) система предназначена для передачи энергии ускоряющего электромагнитного поля ускоряемым протонам и состоит из четырех резонаторов, систем ВЧ питания, стабилизации и управления. Резонаторы ВЧ-системы расположены в долинах полюсов электромагнита [17], замкнуты в центральной области, используют один высокочастотный твердотельный генератор, каналы подстройки частоты установлены на каждом резонаторе и не

требуют системы фазирования напряжения на дуантах [13]. Исходные данные по ВЧ системе MCS230 отображены в Таблице 4.

Таблица 4 Исходные данные по ВЧ системе MCS230

Гармоника ускорения	4
Основная частота ВЧ поля, МГц	106,5
Количество дуантов	4
Количество стем в полурезонаторе	2
Количество генераторов	1
Напряжение на дуантах, кВ	40 - 100
Рассеиваемая ВЧ мощность, кВт	60
Количество емкостных тюнеров	4

Для точного расчета параметров резонаторов ускоряющей системы циклотрона была использована программа CST MICROWAVE STUDIO (CST MWS), предназначенная для численного моделирования высокочастотных устройств (антенн, фильтров, резонаторов). В связи со сложной геометрией резонатора, для наших расчетов особенно важна имеющаяся в CST возможность использования аппроксимации для идеальных граничных условий (Perfect Boundary Approximation, PBA). Модель ускоряющей системы состоит из четырех полуволновых резонаторов с электродами - дуантами, соединенными в центре, располагающимися на двух опорах, и обеспечивающих необходимую жесткость конструкции. При разработке модели ВЧ системы были определены геометрические размеры резонатора, положение и размеры опор, обеспечивающие требуемое значение частоты 106.5 МГц и распределение ускоряющего поля, применяемое в виде трехмерных карт компонент поля при расчетах динамики частиц.

Автором предложен новый метод расчета с использованием программы трехмерного параметрического моделирования Solidworks и пакета программного обеспечения для анализа электромагнитных систем CST Studio Suite, работающих в связке и позволяющий оптимально найти рабочие характеристики резонатора путем автоматического перебора переменных. Данный метод существенно сокращает рабочее время и значительно упрощает достижение результата.

Модель состоит из 8 параметризуемых параметров: параметры “step”, “extract” “start” для параметризации ширины ускоряющего зазора, “stem2_diam” и “stem1_diam” - диаметры внешней и внутренней стемы, “stem2_pos” и “stem1_pos” - расположение внешней и внутренней стемы, “half_cav_h” – высота полурезонатора.

Уравнения, глобальные переменные и размеры

Отфильтровать все поля

Имя	Значение / Уравнение	Равняется	Заметки
Глобальные переменные			
"step"	= "extract" / 10	24.00	
"extract"	= 240	240.00	
"start"	= 12	12.00	
"stem1_pos"	= 460	460.00	
"stem2_pos"	= 1740	1740.00	
"stem2_diam"	= 33	33.00	
"stem1_diam"	= 33	33.00	
"half_cav_h"	= 269.5	269.50	
<i>Добавить глобальную переменную</i>			
Элементы			
<i>Добавить погашение элемента</i>			
Уравнения			
"D1@Sketch2"	= "start"	12mm	
"D2@Sketch2"	= "start" + "step"	36mm	
"D3@Sketch2"	= "start" + "step" * 2	60mm	
"D4@Sketch2"	= "start" + "step" * 3	84mm	
"D5@Sketch2"	= "start" + "step" * 10	252mm	
"D6@Sketch2"	= "start" + "step" * 9	228mm	
"D7@Sketch2"	= "start" + "step" * 8	204mm	
"D8@Sketch2"	= "start" + "step" * 7	180mm	
"D9@Sketch2"	= "start" + "step" * 6	156mm	
"D10@Sketch2"	= "start" + "step" * 5	132mm	
"D11@Sketch2"	= "start" + "step" * 4	108mm	
"D1@Sketch19 stems position"	= "stem1_pos"	460mm	
"D2@Sketch19 stems position"	= "stem2_pos"	1740mm	
"D1@Boss-Extrude1 liner"	= "half_cav_h"	269.5mm	
"D1@Sketch11 - stem 2 shape"	= "stem1_diam"	33mm	
<i>Добавить уравнение</i>			

☒ Перестраивать автоматически Угловые единицы: ▼ ☒ Автоматический порядок решения
☐ Связь с внешним файлом:

OK
 Отмена
 Импорт...
 Экспорт...
 Справка

Рис. 5 Параметризация

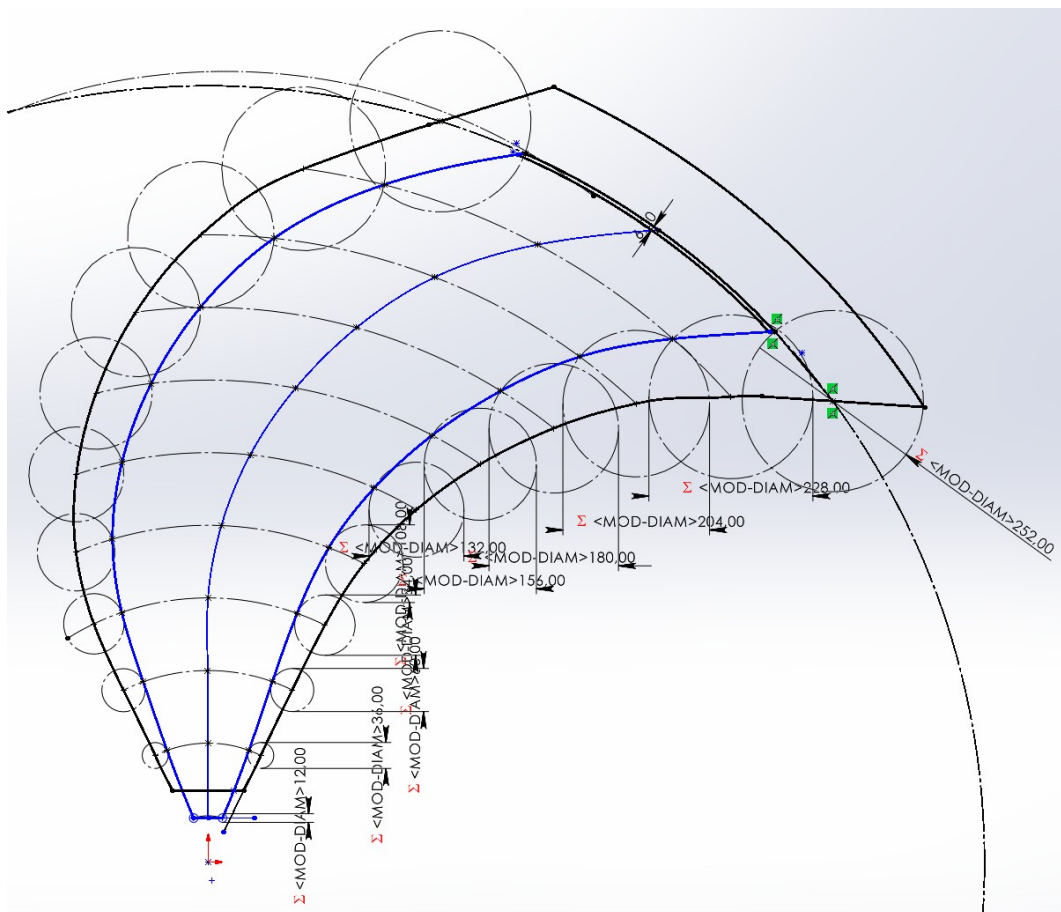


Рис. 6 Параметризация ширины ускоряющего зазора

При проектировании резонатора необходимо найти рабочую моду резонатора, максимально высокое значение добротности, достичь минимального уровня потерь, задать растущее распределение напряжения вдоль ускоряющего зазора.

Для этого нужно произвести оценку влияния:

- Диаметра внутренней стемы
- Расположения внутренней стемы
- Диаметра внешней стемы
- Расположения внешней стемы
- Толщины пластины дуанта
- Апертуры между пластинами дуанта
- Ширины ускоряющего зазора

Опираясь на накопленный опыт, составим Таблице 5, в которой отобразим влияние узлов резонатора на частоту и добротность.

Таблица 5 Влияние узлов резонатора

	частота	добротность	потери	Напряжение в зазоре на данном радиусе
Увеличение диаметра стем	растет	растет	падают	падает
Располож. внут стемы дальше от центра	падает	падает	растут	растет
Увелич. Апертуры между пластинами дуанта	падает	Незначит. изменения	Незначит. изменения	Не оценено
Увелич. толщины пластины дуанта	падает	падает	растут	Не оценено
Увелич. Ширины Уск. Зазора на рад. вывода	растет	падает	растут	падает

Глядя на таблицу, можно сделать вывод, что необходимо искать следующий дизайн с:

- максимально большим радиусом стем (следить за напряжением в зазоре)
- минимально возможной допустимой толщиной пластины дуанта
- минимально возможной допустимой апертурой между пластинами дуанта
- расположением первой стемы ближе к центру (при этом сохраняя условие величины напряжения в 40 кВ)

При расчете модели резонатора необходимо найти оптимальное значение числа ячеек (чем выше ее плотность, тем будет точнее, но дольше расчет), когда увеличение плотности сетки не будет вносить существенный вклад в результат расчета. Глобальная сетка настраивается как для модели (материал “медь”), так и для вакуума. В особо важных местах задается локальная, более плотная сетка.

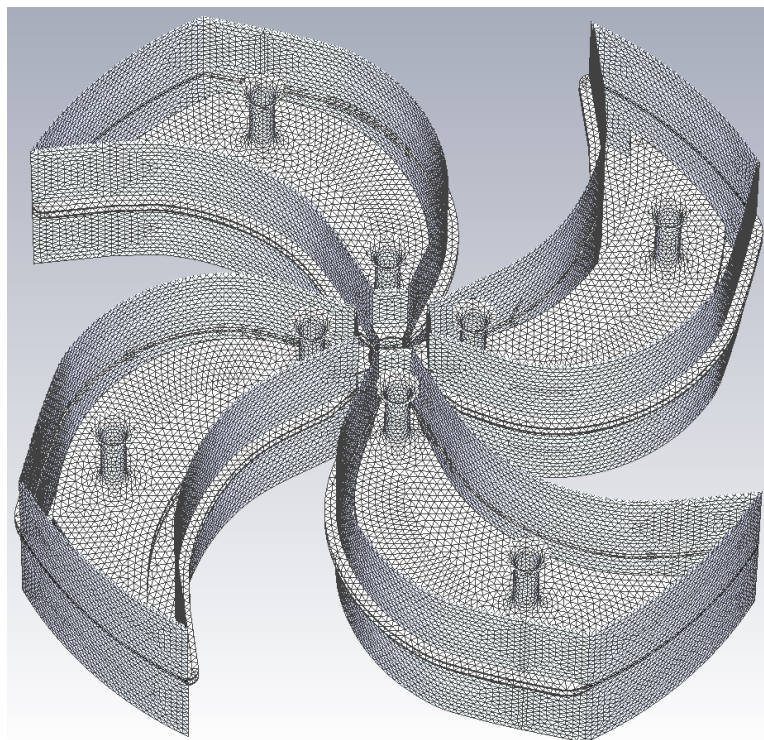


Рис. 7 Пример расчетной сетки

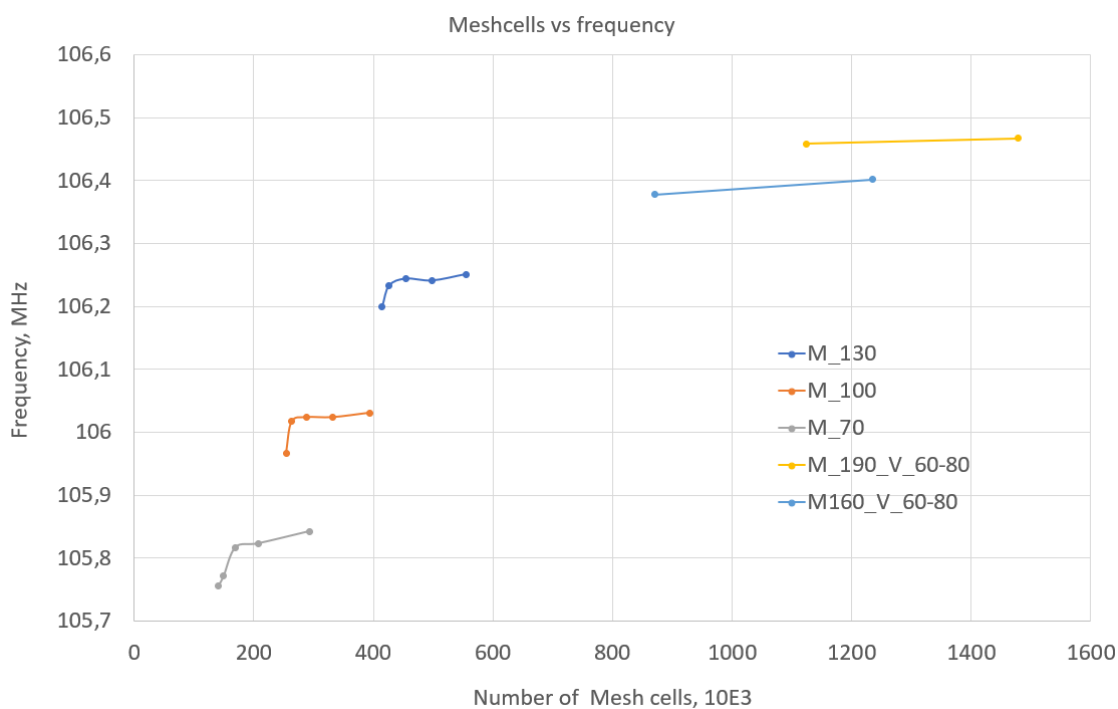


Рис. 8 Оптимизация расчетной сетки

В качестве примера рассмотрим, как плотность сетки влияет на расчет.

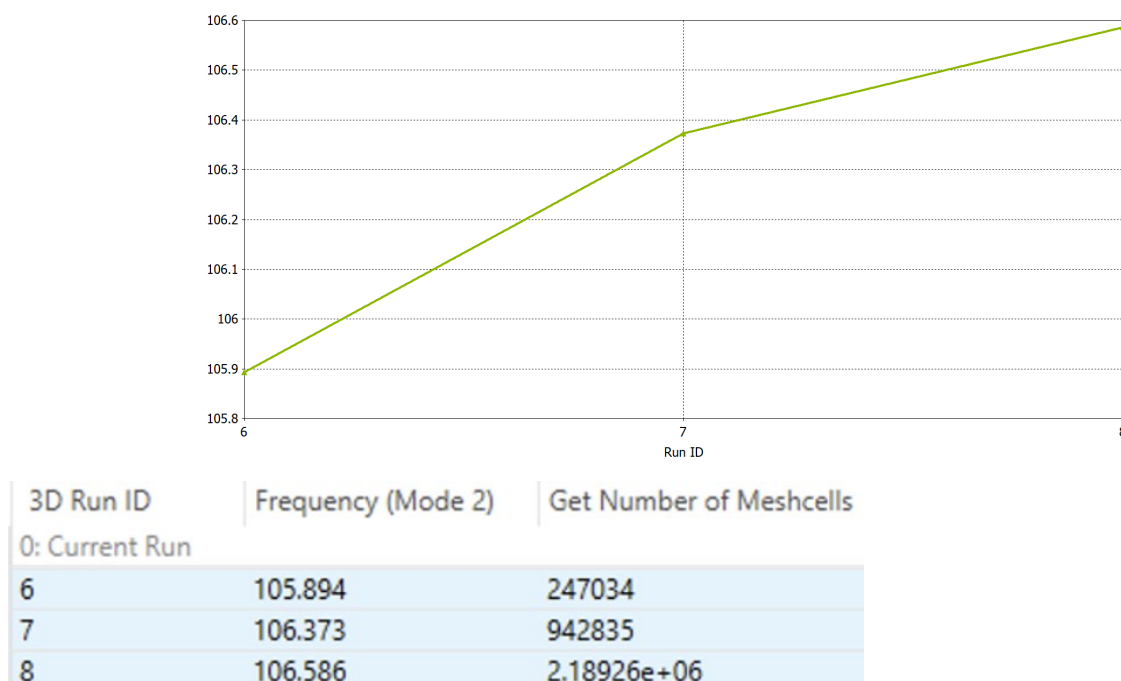


Рис. 9 Пример влияния числа расчетных ячеек на результат

Методика расчета

Методика расчета состоит в следующем: необходимо задать начальные положения и диаметры стем, а также ширину ускоряющего зазора. Затем выполняется предварительный расчет для определения собственной частоты, добротности и распределения напряжения вдоль радиуса. После этого с помощью функционала “optimizer” подбираются оптимальные параметры узлов резонатора, и далее проводится расчет методом перебора. Анализируя электрическое поле в ускоряющем зазоре, поверхностный ток, частоту и добротность, достигается компромисс в настройке параметров ключевых узлов резонатора.

При расчете напряженности электрического поля в ускоряющем зазоре была создана локальная расчетная секта для получения более сглаженной кривой.

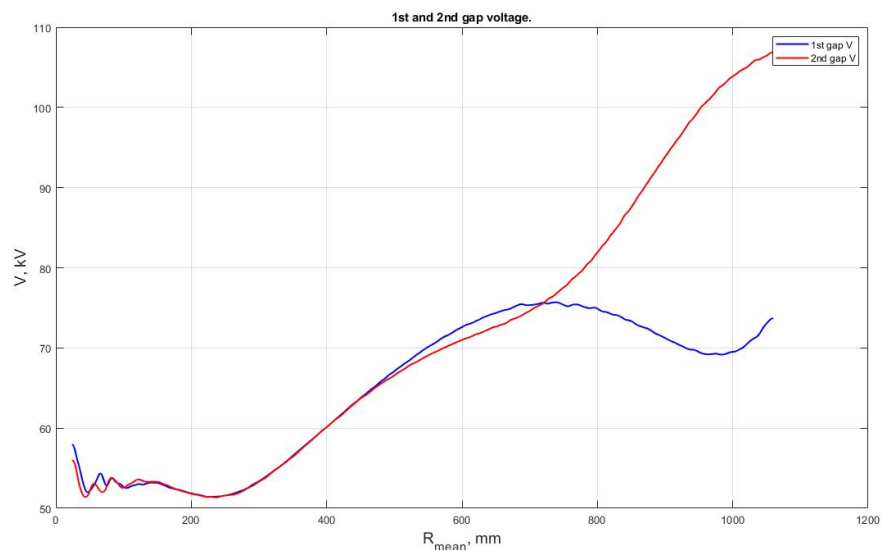


Рис. 10 Напряжение в ускоряющих зазорах

Следует учесть, что в программе по умолчанию расчет ведется с учетом запасенной энергии на 1 Джоуль. Это важно при пересчете величины напряжения вдоль ускоряющего зазора. Расчет ведется без источника ионов. Хотя источник ионов оказывает значительное влияние на напряжение в центральной области (первый оборот пучка), для общей оценки характеристик резонатора его можно исключить из расчета. Это делается для возможности использования плоскости симметрии, что ускоряет расчет в два раза.

Проведен компьютерный расчет системы охлаждения. После расчета электромагнитных полей можно видеть величину потерь мощности (соответственно, нагрев) на основных узлах резонатора:

Центральная стема	2070 Вт
Стема на выводе	2930 Вт
Пластина дуанта	790 Вт
Половина плакировки	1815 Вт

Для расчета системы охлаждения выбраны трубки охлаждения с внутренним диаметром 8 мм и определен требуемый поток воды $P + 30\%$ для каждого нагретого узла.

В программе Solidworks спроектированы расположение трубок охлаждения по поверхности плакировки резонатора, пластины дуанта и внутри стем. Выполнены два тепловых расчета для оценки нагрева поверхностей резонатора: CST Conjugate heat transfer solver (метод конечных элементов) и Solidworks CFD solver. В реальных условиях на вход трубок охлаждения подается вода температурой 20°C, которая, проходя по нагретой поверхности, забирает тепло и нагревается. На входе и выходе трубок охлаждения принимаем разницу температур воды $\Delta T = 10^\circ \text{C}$. При расчете в CST на медные трубки (поток воды не учитывается) устанавливаем среднее значение - 25° C. В случае с Solidworks на вход каждой трубки подается вода с температурой 20°, используется метод конечных объемов, задается величина потока воды на вход каждой трубки, учитывается геометрия трубки, что позволяет предполагать, что этот метод дает более точный результат.

Для отведения теплового потока P [Вт] требуется поток воды V [м³/с]:

$$V = \frac{P}{c\rho\Delta T}$$

Скорость воды v (м/с) рассчитывается по формуле:

$$v = \frac{4V}{\pi d^2}$$

В Таблице 6 отображены результаты расчетов.

Таблица 6 Расчет охлаждения

Контур резонансной системы	P +30%, Вт	Поток воды V, м³/с	Поток воды, л/мин	Скорость воды v, м/с при d=8мм
1-4 (плакировка)	2360	5,66 E-05	3,4	1,12
5 (дуант)	1030	2,47 E-05	4,12	0,49
6 (носовая стема)	2690	6,45 E-05	10,75	1,28
7 (задняя стема)	3810	9,14 E-05	15,23	1,82
Итого по 4 резонаторам	79120	189,76E-05	113,856	\

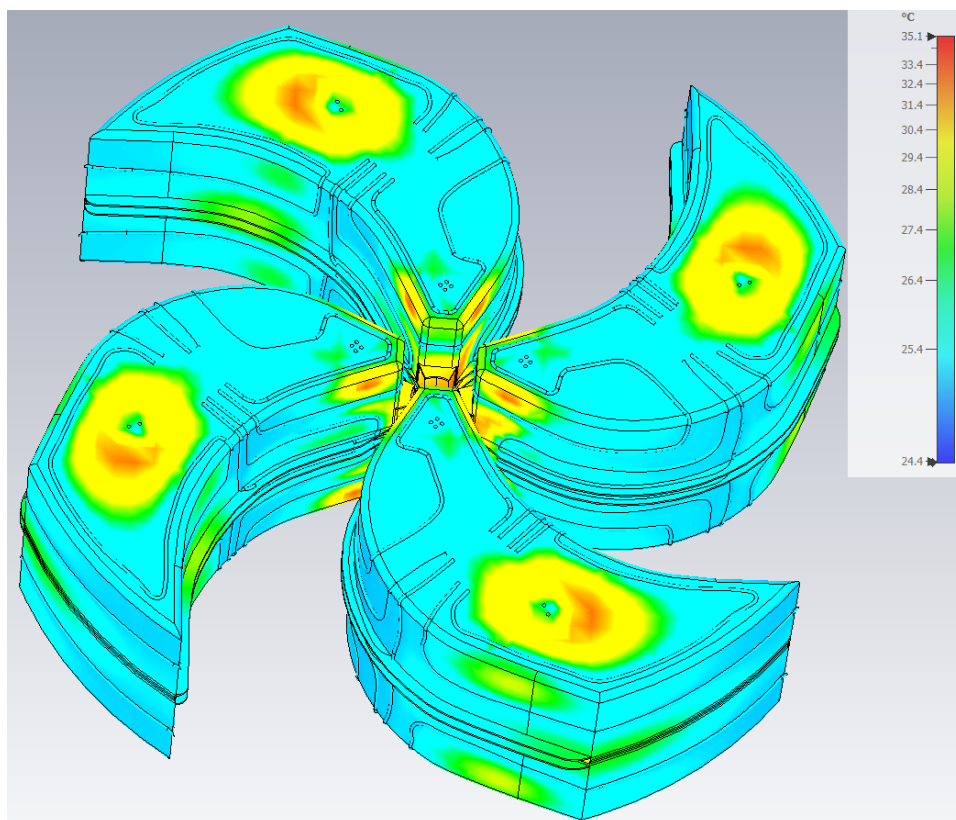


Рис. 11 Визуализация нагрева плакировки резонатора при охлаждении в CST

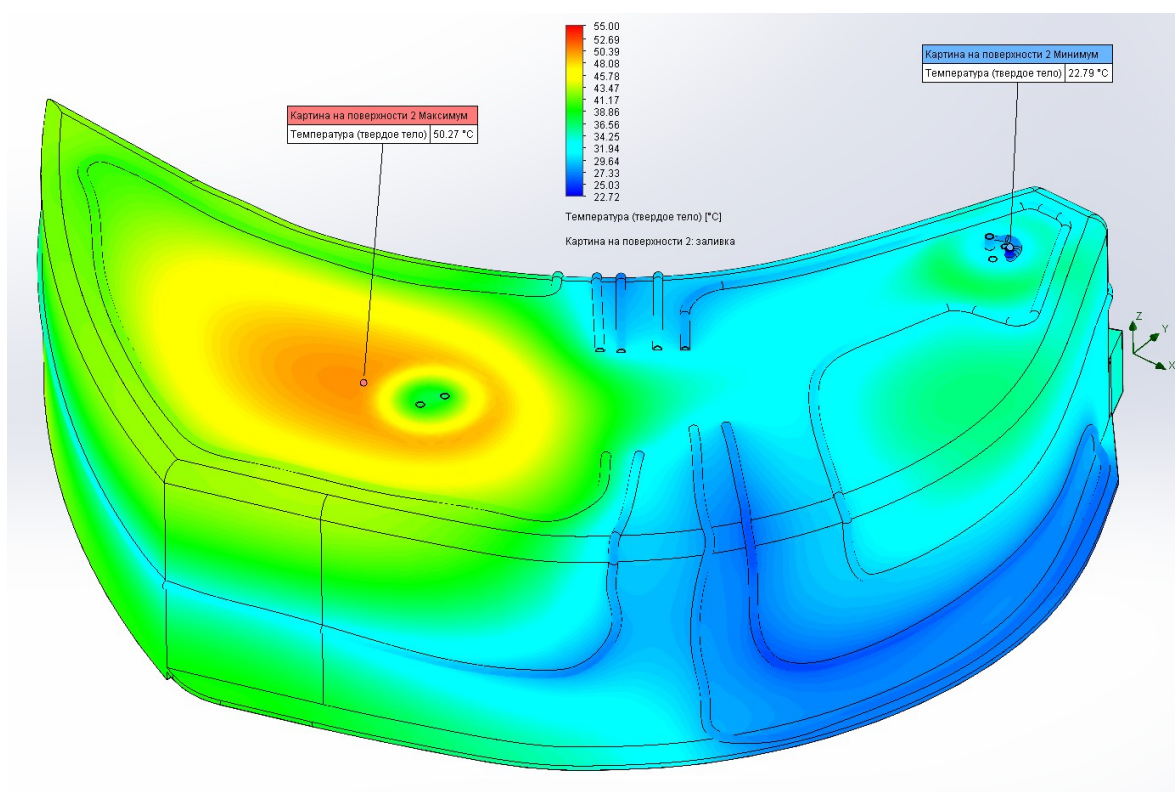


Рис. 12 Визуализация нагрева плакировки полурезонатора в Solidworks (правая сторона)

В связи со сложной геометрией трубок охлаждения расчет потерь давления также проводился в Solidworks при помощи расчетчика CFD (от англ. Computational fluid dynamics), предназначенных для вычисления характеристик потоковых процессов.

Вычисление длится до тех пор, пока не будут выполнены условия сходимости.

Список целей				
Имя	Текущее значение	Прогресс сходимости	Критерий	Среднее значение
inlet pressure	106144 Pa	Достигнуто (IT = 361)	1134.44 Pa	106156 Pa
inlet velocity	0.869637 m/s	Достигнуто (IT = 361)	8.69637e-09 m	0.869637 m/s
outlet pressure	101717 Pa	Достигнуто (IT = 361)	0.537923 Pa	101717 Pa
outlet velocity	0.872378 m/s	Достигнуто (IT = 419)	0.000198666 m	0.872356 m/s

Рис. 13 Окно симуляции

В Таблице 7 показаны результаты расчета потери давления в трубках охлаждения.

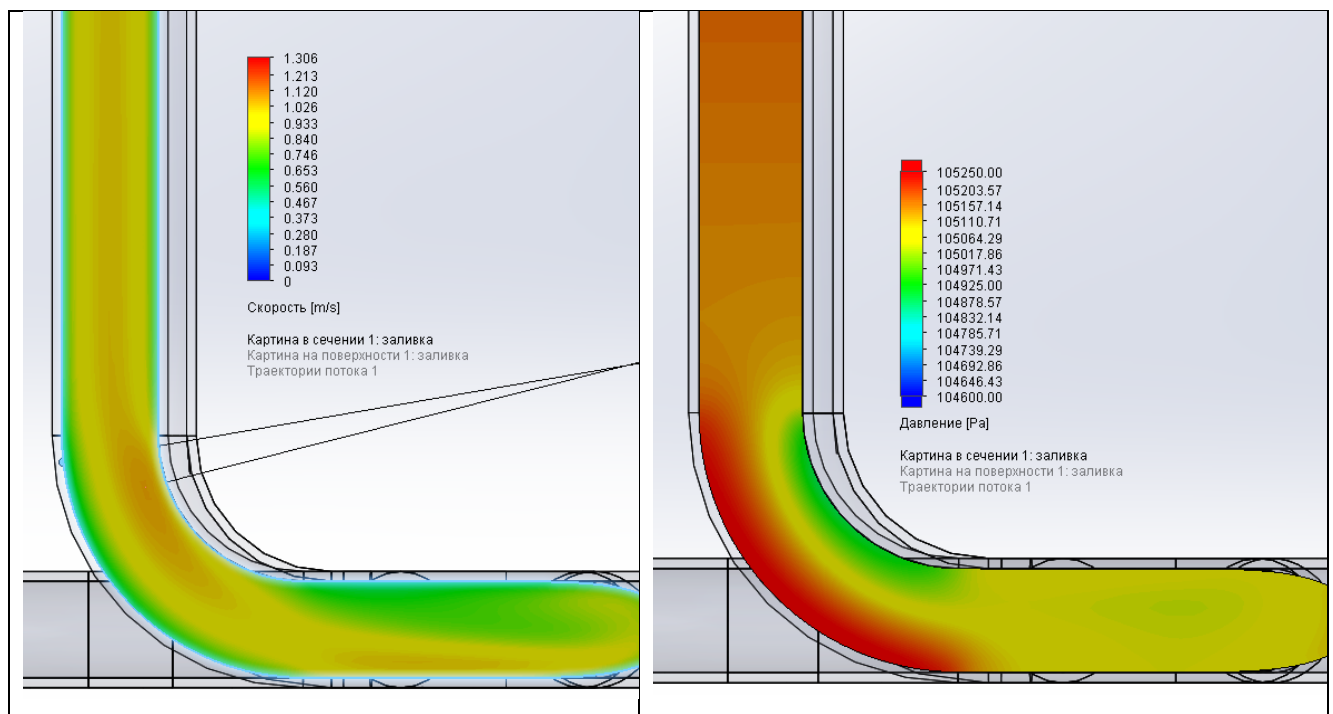


Рис. 14 Визуализация давления и скорости потока на повороте трубки

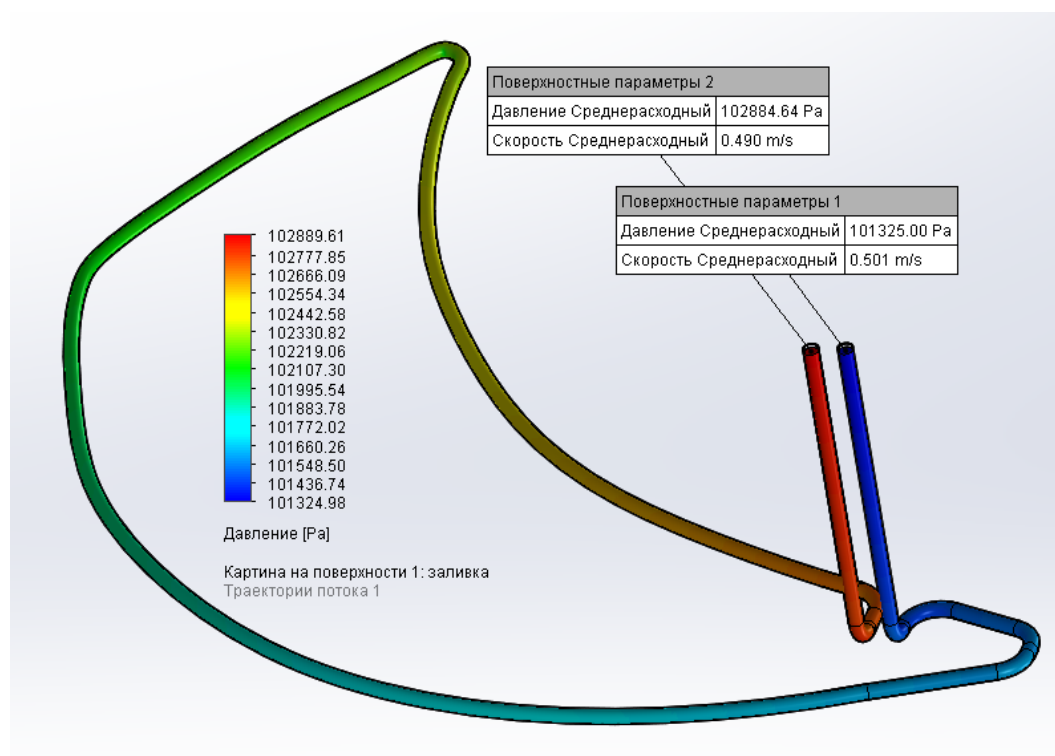


Рис. 15 Визуализация потери давления в трубке охлаждения пластины дуанта

Таблица 7 Потеря давления в трубках охлаждения

Контур резонансной системы	Потеря давления, Па
1-4 (плакировка)	\
1. центр	427
2. Задняя часть	709
3. Внутр бок	858
4. Внеш бок	698
5 (дуант)	1559
6 (носовая стема)	6141
7 (задняя стема)	6141
Итого по 4 резонаторам	132264

В результате работы проведена оптимизация системы охлаждения, определен расход воды, потеря давления в трубках охлаждения, температура поверхности резонатора. Все тепловые потери ускоряющей системы выводятся при расходе охлаждающей воды, равном 114 л/мин.

Петля связи

Для передачи мощности в резонатор необходимо такое устройство как петля связи. Разработкой петли связи занимаются сотрудники НТЦ «ЛУЦ», АО «НИИЭФА». После обсуждения дизайна петли с автором была передана трехмерная модель петли, и автор произвел ее компьютерный расчет.

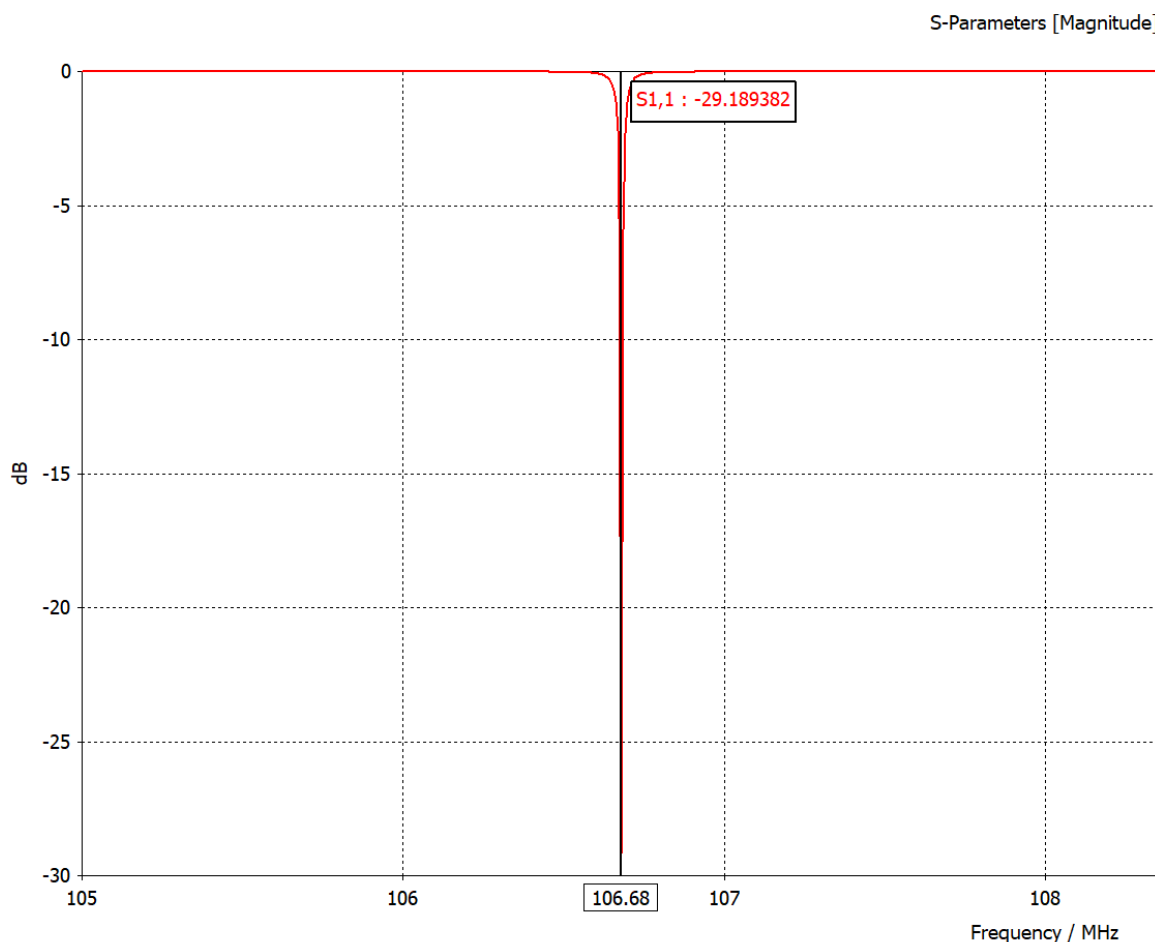


Рис. 16 Рассчитанное значение коэффициента отражения S11

Расчет показал, что размер петли хорошо оптимизирован, возможен ввод полной мощности в резонатор без потерь, имеется дополнительный запас ее площади для возможности согласования.

В процессе проектирования укоряющей системы циклотрона проведены следующие работы:

- Разработана трехмерная параметрическая модель резонатора, обладающими необходимыми для ускорения пучка характеристиками.

- Предложен новый метод расчета в CST на основе перебора переменных, заданных в трехмерной параметрической модели.
- Произведена оценка влияния толщины пластины дуанта на частоту, добротность и распределение напряжения вдоль ускоряющего зазора
- Произведена оценка влияния диаметра внутренней стемы на частоту, добротность и распределение напряжения вдоль ускоряющего зазора
- Произведена оценка влияния расположения внутренней стемы на частоту, добротность и распределение напряжения вдоль ускоряющего зазора
- Произведена оценка влияния диаметра внешней стемы на частоту, добротность и распределение напряжения вдоль ускоряющего зазора
- Произведена оценка влияния расположения внешней стемы на частоту, добротность и распределение напряжения вдоль ускоряющего зазора
- Произведена оценка влияния ширины ускоряющего зазора на частоту, добротность и распределение напряжения вдоль ускоряющего зазора
- Произведен расчет системы охлаждения
- Произведен расчет потерь давления в трубках охлаждения
- Предложен способ подстройки резонатора под необходимую частоту посредством обточки стем
- Произведен расчет петли связи
- Подготовлено техническое задание для производства ускоряющей системы

В результате расчетов определены параметры резонатора, отображенные в Таблице 8:

Таблица 8 Рабочие характеристики резонатора

Параметр	значение
Высота резонатора, мм	561
Расстояние между пластинами дуантов, мм	21
Радиус вывода, мм	1070
Радиус внутренней стемы, мм	66

Радиус внешней стемы, мм	66
Положение внутренней стемы, мм	460
Положение внешней стемы, мм	1760
Толщина пластины дуанта, мм	14
Ширина ускоряющего зазора на радиусе вывода, мм	130
Угловая протяженность резонатора, град	45/27

По результатам компьютерного расчета ускорителя, автором было подготовлено техническое задание на проектирование ВЧ системы, где были сформулированы требования к производству резонатора, вводу сигнала, требования к датчикам сигналов и подстройке режима работы, генератору, системе водяного охлаждения и системе контроля.

В заключении представлены основные результаты:

В работе изложены результаты проектирования и наладки полуволновых резонаторов для ускоряющих систем циклотронов, применяемых в протонной терапии. Рассмотрены особенности проектирования, позволяющие которые обеспечивают создание эффективных высокодобротных резонаторов.

В ходе исследования:

1. Впервые при разработке высокочастотного резонатора циклотрона SC200 был применён новый подход, включающий создание трёхмерной компьютерной модели с последующей оптимизацией рабочих параметров (собственной частоты, добротности, распределения напряжения вдоль радиуса). В результате:

- Определены основные характеристики резонатора (собственная частота — 91,5 МГц, добротность — около 6200, напряжение 60 кВ в центре и 120 кВ в зоне вывода).
- Разработана и реализована система подстройки резонансной частоты (закорачивающие устройства) в диапазоне 88,8–91,8 МГц.

Изготовленная физическая модель резонатора, подтвердила правильность компьютерного моделирования ускоряющего резонатора.

2. В процессе дальнейшего развития методики проектирования резонаторов для циклотрона MSC230 достигнуты следующие результаты:

- Оптимизирована геометрия резонатора, обеспечивающая требуемые параметры: собственная частота — 106,5 МГц, расчетная добротность — около 11 000, распределение напряжения вдоль радиуса — от 50 до 90 кВ.
- Выполнен анализ нагрева узлов резонатора.
- Рассчитаны рабочие параметры потока и потери давления в системе охлаждения.
- Определены геометрические размеры (площадь) индуктивной петли связи с возможностью подстройки для эффективной передачи мощности в резонатор.
- Разработанная ускоряющая система будет изготовлена в соответствии с оптимизированной компьютерной моделью.

Сравнительный анализ показал, что при схожих характеристиках резонатора MSC230 и резонатора серийного циклотрона C235 оптимизация конструкции позволила увеличить расчетную ненагруженную добротность на 10%. Верификация метода расчёта резонатора циклотрона C235 была выполнена путём сопоставления с экспериментальными и теоретическими результатами бельгийских коллег, что подтвердило корректность полученных данных.

Полученные результаты демонстрируют значительный прогресс в разработке компактных и энергоэффективных ускорительных систем изохронных циклотронов. Разработанные системы обеспечивают высокий темп ускорения пучка (500 оборотов в MSC230 против 800 оборотов в C235-V3), что имеет важное значение для повышения эффективности ускорителей.

Кроме того, накопленный объем расчетных данных послужит основой для дальнейшего использования в машинном обучении моделей, что позволит усовершенствовать проектирование и оптимизацию ускорительных систем в будущих циклотронах.

Список литературы

1. Агапов А.В. 50 лет со дня облучения первого пациента протонным пучком в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) / А.В. Агапов и др. // Медицинская физика. - 2017. - N 4 (76). - Сс. 121-125. ISSN: 1810-200X.
2. Савченко О.В. 40 лет протонной терапии на синхроциклотроне и фазотроне ЛЯП ОИЯИ / О.В. Савченко // Медицинская физика. - 2007. - N 3-4.
3. Агапов А.В. Опыт использования протонной лучевой терапии в Объединенном Институте Ядерных Исследований, г. Дубна / А.В. Агапов и др. // Медицинская радиология и радиационная безопасность. - 2019. - Т. 64. - N 2. - Сс. 61–69.
4. Patriarca A. FLASH Radiation Therapy: Accelerator Aspects // 11th Intern. Part. Accel. Conf. “IPAC 2020”, Caen, France. - 2020.
5. Концепция разработки и создания научно-клинического центра протонной терапии на основе сверхпроводящего протонного циклотрона MSC-230 в г. Дубне [Электронный ресурс] / А.В. Агапов и др. - 2023. - Режим доступа: http://www1.jinr.ru/Books/Proton_terap.pdf
6. Вероника Скворцова посетила с рабочим визитом г. Димитровград [Электронный ресурс] – 2021. - Режим доступа: <https://fnkcrio.ru/news/veronika-skvortsova-posetila-s-rabochim-vizitom-g-dimitrovgrad/>
7. Протонная терапия сегодня и завтра [Электронный ресурс] / Г.В. Мицын и др. – 2008. – Режим доступа: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/mirrors/m025.htm>
8. CST Studio Suite [electronic resource]: Electromagnetic Field Simulation Software. https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/?utm_source=cst.com&utm_medium=301&utm_campaign=cst
9. Kostromin S.A. Effects of the magnetic field from the accelerating system on the beam dynamics in the cyclotron / S.A. Kostromin et al. // Physics of particles and nuclei letters. - 2012. - Vol. 9. - N 4-5, - Pp. 384-387.

- 10.Design of SC230 - the new cyclotron for proton therapy [Электронный ресурс]:
постер / D. Popov, O. Karamyshev, G. Karamysheva, S. Gurskiy, V. Malinin, G.
Shirkov, S. Shirkov, V. Smirnov, S. Vorozhtsov. - Режим доступа:
https://indico.cern.ch/event/803528/sessions/318999/attachments/1903846/3159517/Poster_DPopov_SC230.pdf
- 11.Chen G. Research and development of Rf system for SC200 cyclotron / G. Chen
et al. // 9th International Particle Accelerator Conference. - 2018. ISBN: 978-3-
95450-184-7, DOI:10.18429/JACoW-IPAC2018-THPAL004.
- 12.Solidworks [electronic resource]: Modeling and simulation software.
<https://www.solidworks.com/>
- 13.Гикал Б.Н. Новое поколение циклотронов тяжелых ионов для прикладных
исследований и промышленного применения: дис. ... д-ра физ.-мат. наук:
01.04.20 / Гикал Борис Николаевич. - Дубна, - 2013. -166 с.
- 14.Сверхпроводящий компактный изохронный циклотрон: Patent 2702140(RU),
BIPM № 28 / K.S. Bunyatov, ... O.V. Karamyshev et al. // 04.10.2019

Публикации автора по теме диссертации

15. Karamysheva G.A. Динамика пучка в изохронном циклотроне для
медико-биологических исследований MSC230 / G.A. Karamysheva, ..., S.V.
Gurskij et al., // XXVIII International Conference. - 2023.
<https://indico.inp.nsk.su/event/114/contributions/2810/>
16. Karamysheva G.A. Progress in Design of MSC230 Superconducting
Cyclotron for Proton Therapy / G.A. Karamysheva, ..., S.V. Gurskiy et al., //
CYC2022 Proceedings of the 23rd International Conference on Cyclotrons and
their Applications, , Beijing, China. – 2022.
17. Karamyshev O.V. Research and Development of the SC230
Superconducting Cyclotron for Proton Therapy / O.V. Karamyshev, ..., S.V.

- Gurskiy et al. // Physics of Particles and Nuclei Letters. - 2021. - Vol. 18. - N 1. - Pp. 63-74. ISSN:1547-4771.
- 18.Karamyshev O.V. JINR projects of cyclotron for proton therapy / O.V. Karamyshev, ..., S.V. Gurskiy et al. // JACoW Publishing, Geneva, Switzerland. - 2020. <http://accelconf.web.cern.ch/cyclotrons2019/doi/JACoW-Cyclotrons2019-TUB02.html>
 - 19.Karamysheva G.A. JINR PROJECTS of CYCLOTRON FOR PROTON THERAPY / G.A. Karamysheva, ..., S.V. Gurskiy et al., // International Conference on Cyclotrons and their Applications (22nd), CYC 2019, Cape Town, South Africa. - 2019. - Pp. 141-144.
 - 20.Karamysheva G.A. Design of SC230 - the new cyclotron for proton therapy / G.A. Karamysheva, ..., S.V. Gurskiy et al., // International Conference on Medical Accelerators and Particle Therapy, OMA consortium, Seville, Spain. - 2019. <https://indico.cern.ch/event/803528/>
 - 21.Karamyshev O.V. Conceptual Design of the SC230 Superconducting Cyclotron for Proton Therapy / O.V. Karamyshev, ..., S.V. Gurskiy et al. // JACoW Publishing, Geneva, Switzerland. - 2019. <http://accelconf.web.cern.ch/ipac2019/doi/JACoW-IPAC2019-TUPTS059.html>
 - 22.Karamysheva G.A. Beam Dynamics Simulations in the Dubna SC230 Superconducting Cyclotron for Proton Therapy / G.A. Karamysheva, ..., S.V. Gurskiy et al. // JACoW Publishing, Geneva, Switzerland. - 2019. <http://accelconf.web.cern.ch/ipac2019/doi/JACoW-IPAC2019-TUPTS060.html>
 - 23.Karamysheva G.A. Compact Superconducting Cyclotron SC200 for Proton Therapy / G.A. Karamysheva, ..., S.V. Gurskiy et al. // JACoW Publishing, Geneva, Switzerland. - 2017. <https://dx.doi.org/10.18429/jacow-cyclotrons2016-thc03>

- 24.Karamysheva G.A. Present Status of the SC202 Superconducting Cyclotron Project / G.A. Karamysheva, ..., S.V. Gurskiy et al. // JACoW, Geneva, Switzerland. - 2017. <https://dx.doi.org/10.18429/jacow-ipac2017-thpva120>
- 25.Karamysheva G.A. Research and Development of a Compact Superconducting Cyclotron SC200 for Proton Therapy / G.A. Karamysheva, ..., S.V. Gurskiy et al. // JACoW, Geneva, Switzerland. - 2017. <https://dx.doi.org/10.18429/jacow-ipac2016-tupmr016>
- 26.Shirkov G.D. Hadron Therapy Research and Applications at JINR / G.D. Shirkov, ..., S.V. Gurskiy et al. // XXV Russian Particle Accelerator Conference, Russian Academy of Science, Scientific Council on Charged Particle Accelerators, Peterhof, St. Petersburg, Russia. - 2016. <http://accelconf.web.cern.ch/rupac2016/doi/JACoW-RuPAC2016-THYMH02.html>
- 27.Syresin E. M. C235V3 Cyclotron for a Proton Therapy Center to be Installed in the Hospital Complex of Radiation Medicine / E.M. Syresin, ..., S.V. Gurskii et al. // Technical Physics. The Russian journal of applied physics. - 2014. - Vol. 84. - N 6. – Pp. 132-139. ISSN:1063-7842.
- 28.Kostromin S.A. Cyclotron C235-V3 for Dimitrovgrad Hospital Center of the Proton Therapy / S.A. Kostromin, ..., S.V. Gurskiy et al. // JACoW, Geneva, Switzerland. - 2014. <http://accelconf.web.cern.ch/IPAC2014/doi/JACoW-IPAC2014-WEPRI090.html?n=IPAC2014/doi/JACoW-IPAC2014-WEPRI090.html>
- 29.29Jongen Yves RF cavity design for superconducting C400 cyclotron / Yves Jongen, ... , Semion Gurskiy et al. // Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei Letters. - 2012. - Vol.8. - N 4 (167). - Pp. 647-654. ISSN:1814-5957, eISSN:1814-5973
- 30.30Jongen Yves Compact superconducting cyclotron C400 for hadron therapy / Yves Jongen, ... , Semion Gurskiy et al. // Nuclear Instruments and Methods. – 2010. - Vol. 624. - N 1, - Pp. 47-53.