



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Джелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

«Резонаторы ускоряющих систем изохронных циклотронов для протонной терапии»

Гурский Семен Владимирович



Структура диссертации

Введение

Глава 1. Ускорители для протонной терапии (обзор)

Глава 2. Медицинский циклотрон ОИЯИ – ИВА С235-V3

Глава 3. Циклотрон SC200 со сверхпроводящей обмоткой

Глава 4. Медицинский Изохронный Циклотрон MSC-230 со сверхпроводящей обмоткой

Заключение



Цель 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 C235 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) Подготовка технического задания на производство ускоряющей системы циклотрона MSC230
- 7) Создание трехмерной параметрической модели резонатора MSC230
- 8) Оптимизация расчетной сетки
- 9) Создание новой методики расчета поиска рабочих характеристик резонатора MSC230 на основе перебора переменных параметрической модели
- 10) Расчет, проектирование и оптимизация системы охлаждения ускоряющей системы MSC230
- 11) Расчет индуктивной петли связи

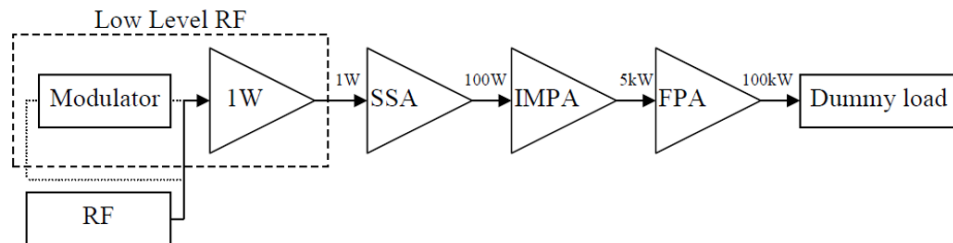


Глава 1. Медицинский циклотрон ОИЯИ-ИВА С235-V3



Энергия ускоренных протонов, МэВ	232
Среднее магнитное поле, Тл в центре: на радиусе вывода:	1.7 2.15
Радиус вывода, м	1.08
Магнитное поле на радиусе вывода, Тл в холме в долине	2.90 0.98
Зазор, см в долине в холме	60 9.6-0.9
Периодичность структуры магнитного поля	4
Ампер-витки обмотки, кА	525
Потребляемая мощность обмотки магнита, кВт	190
Вес магнита, т	210
Количество дуантов	2
Частота бетатронных колебаний Q_r/Q_z	1-1.37/0-0.28

Высокочастотная система



ВЧ система состоит из трех основных подсистем:

- ВЧ резонаторы
- Цепь усиления мощности
- Электроника управления LLRF (low level radio frequency)

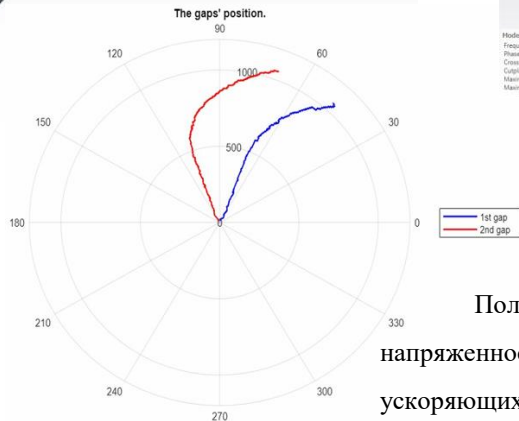
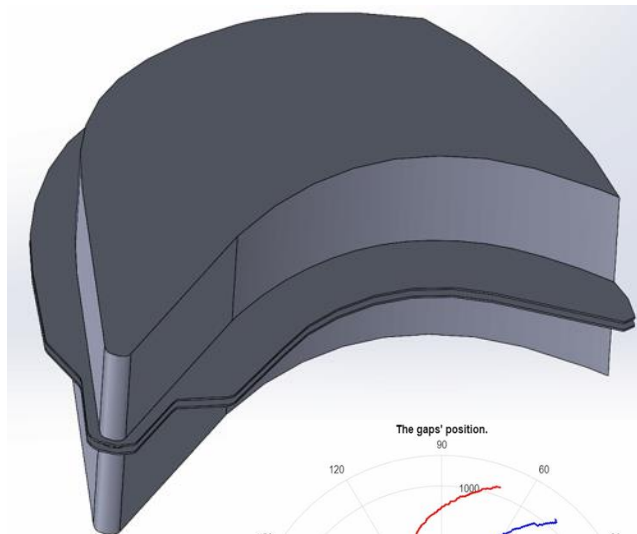




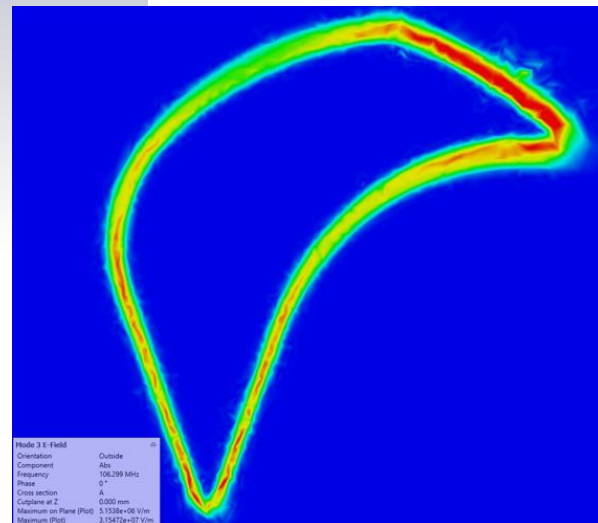
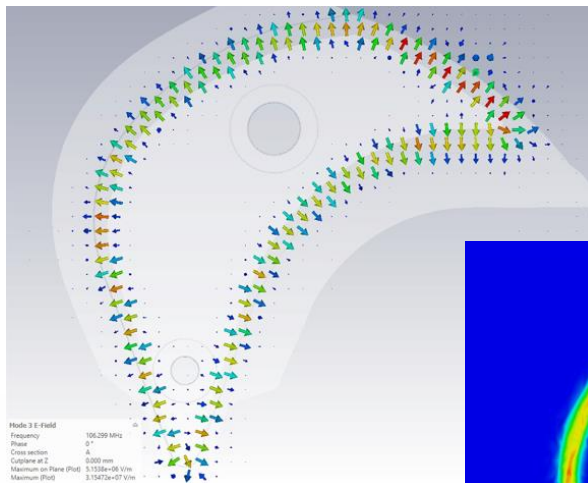
Параметр	Величина
Ускоряющая система	Два резонатора в противоположных долинах
Гармоника	4
Рабочая частота	106,2 МГц
Ускоряющее напряжение в центре/на радиусах вывода	60/120 кВ
Длина резонатора	52 см
Полная мощность	100 кВт
Мощность потерь	65 кВт
Увеличение температуры резонатора при работе	20° С

Расчет в CST MWS

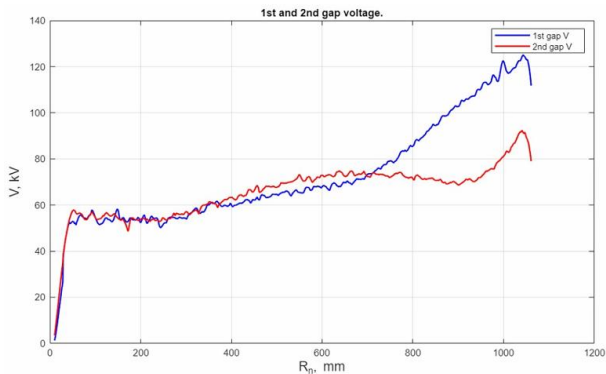
Распределение векторов электрического поля в зазоре



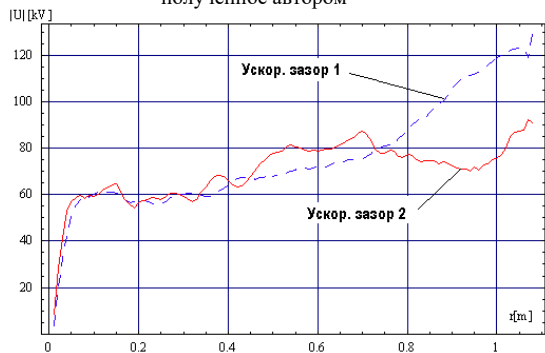
Положение максимумов
напряженности электрического поля в
ускоряющих зазорах



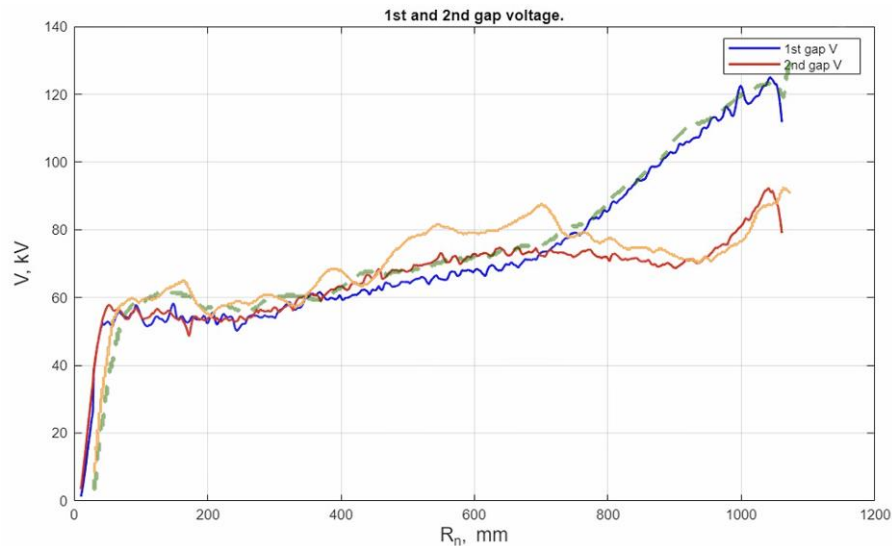
Расчет в CST MWS



Расчитанное распределение напряжения вдоль радиуса,
полученное автором



Расчитанное распределение напряжения вдоль радиуса, полученное сотрудниками ИВА [1]



Красная и синяя линия (результат автора) соответствуют внутренней и внешней стороне резонатора, соответственно.

Оранжевая и зеленая – результат сотрудников ИВА.

1) 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.



Заключение к главе 2

- В процессе работы над проектом циклотрона С235-V3 был произведен компьютерный расчет модели ВЧ резонатора по поиску собственной частоты и определению величины добротности.
- Полученные карты компонент электрического поля были использованы для расчетов динамики пучка.
- Автор убедился в соответствии результатов расчетных параметров и параметров действующего резонатора.
- Автор непосредственно участвовал в сборочных и пуско-наладочных работах, которые производились в 5 корпусе ЛЯП, ОИЯИ. Были проведены работы по тренировке резонатора, настройке и вводу ВЧ мощности в ускоритель, монтаже и настройке радиального пробника для регистрации пучка.
- Опыт работ над ускоряющей системой был применен в последующих разработках циклотронов SC200 и MSC230.



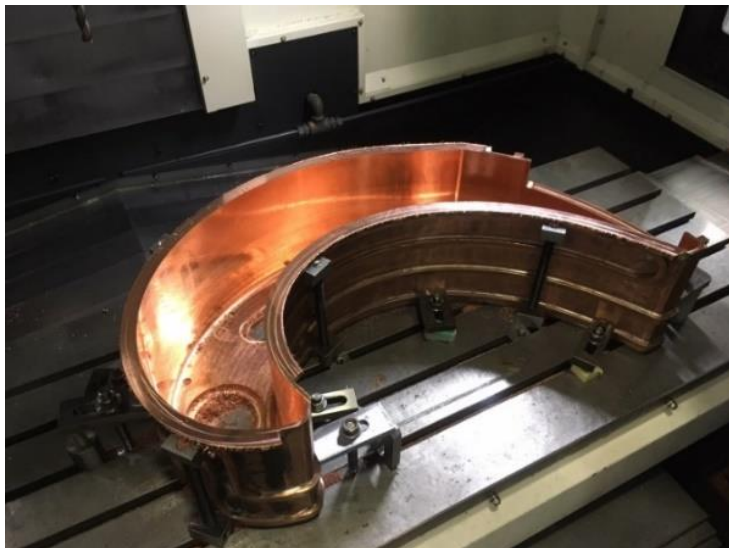


Циклотрон SC200 со сверхпроводящей обмоткой



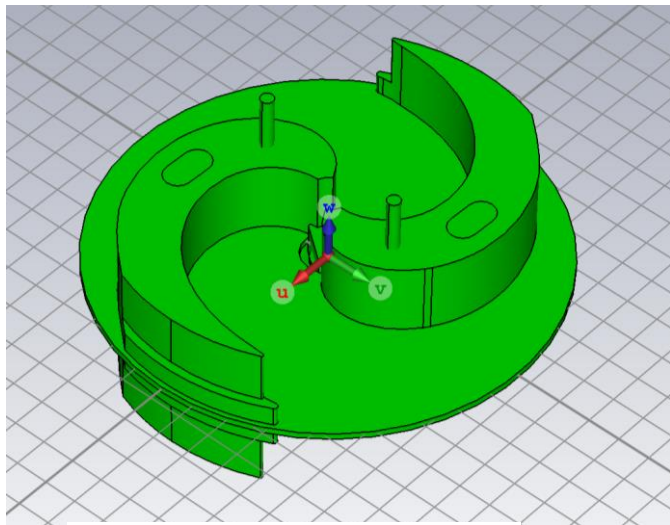
Параметр	Значение
Внешний радиус ярма, м	1.25
Радиус полюса, м	0.61
Высота ярма, м	1.7
Высота долины, м	0.54
Материал ярма	St. 1010
Магнитное поле в холме/долине, Тл	4.75 / 3
Количество ампер витков	730000
Общий вес магнита, т	55

Основные параметры высокочастотной системы SC200



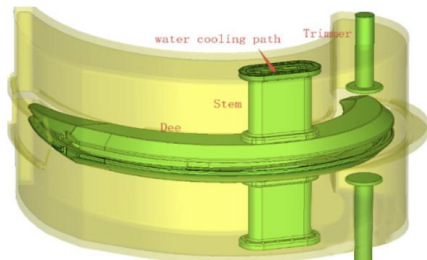
Параметр	Значение
Высота резонатора	500 мм
Диаметр резонатора	1280 мм
Частота	91.5 МГц (2 гармоника)
Количество резонаторов	2
Мощность	~ 100 кВт
Тип резонатора	Полуволновой коаксиальный
Ускоряющее напряжение	60 кВт (центр) – 120 кВт (вывод)
Азимутальная протяженность дуанта	40°
Азимутальная протяженность резонатора	50°
Азимутальная протяженность уск. зазора	7°

Компьютерные расчеты в CST Studio

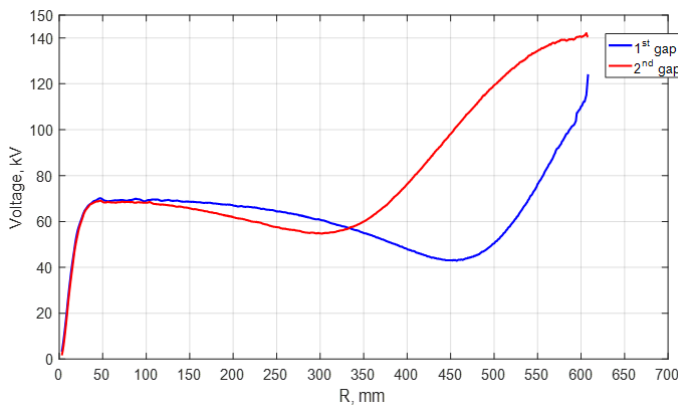


Проведены следующие работы:

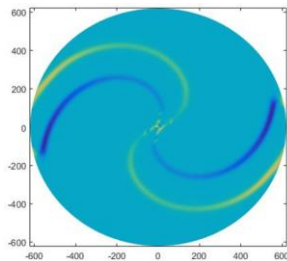
- Трехмерное моделирование резонатора
- Поиск собственной частоты и добротности при помощи вычислителя собственных мод для вычисления частот и распределений электромагнитных полей (eigenmode solver, CST studio suite)
- Получение карты компонент электрического поля для расчета динамики пучка.
- Достижение проектного распределения напряжения вдоль радиуса



Компьютерные расчеты резонатора SC200

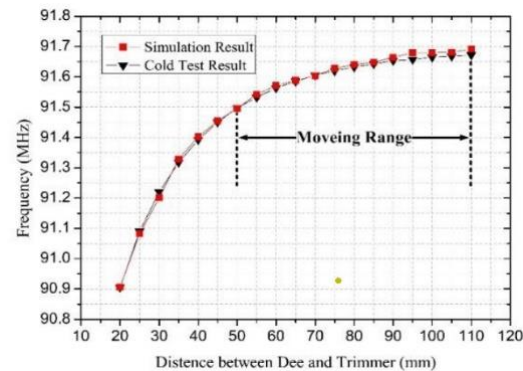
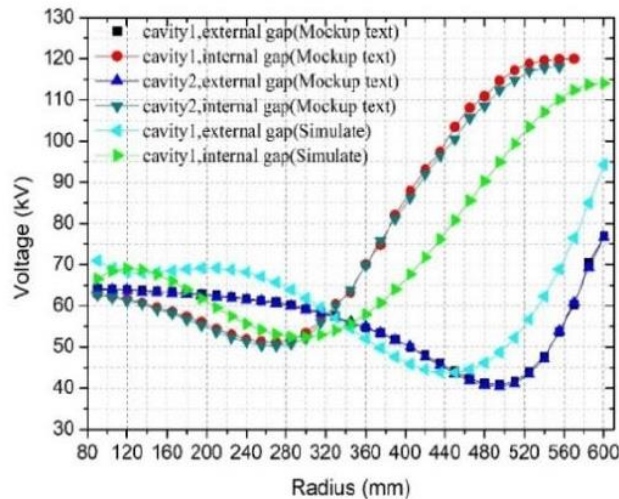


Распределение напряжения вдоль радиуса. Расчет автора.



ускоряющая компонента электрического

поля (в полярной системе координат)



Сравнение расчета и физического измерения по вкладу триммера в частоту [2]

Узел	Потери, кВт
Стема	21.06
Дуант	34.33
Плакировка	28.59



Заключение к главе 3

- На основе моделирования были определены характерные параметры радиочастотного резонатора.
- Был найден точный собственный режим на рабочей частоте 91,5 МГц. Значение ненагруженной добротности составляет около 6100 (в холодном испытании 5200).
- Были достигнуты значения напряжения 60 кВ в центре и 120 кВ в зоне вывода. Общая потеря мощности резонатора составляет 84 кВт, поэтому в соответствии с этим требованием был выбран усилитель с максимальной мощностью ~ 100 кВт.
- Полученные карты компонент электрического поля были использованы для расчетов динамики пучка.



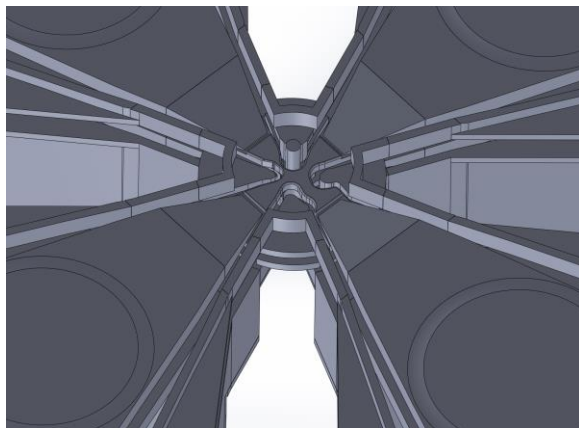
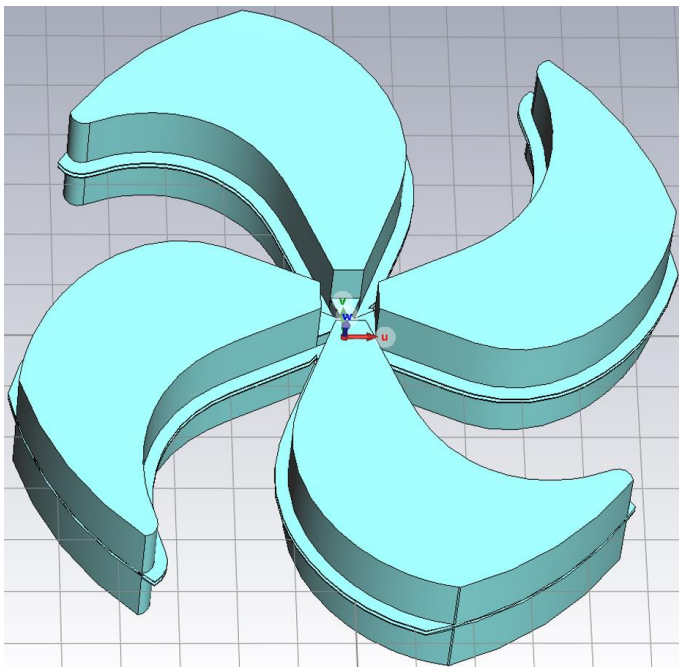
Медицинский Изохронный Циклотрон MSC-230 со сверхпроводящей обмоткой



Тип магнита	СП обмотка, “теплое” ярмо
Конечная энергия, МэВ	230
Среднее магнитное поле (центр/вывод), Тл	1.7/2.15
Габариты (высота × ширина), м	1.8×3.8
Вес магнита, тонн	130
Зазор холма / долины, мм	50/700
Число ампер-витков	300000
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



Высокочастотная система MSC-230



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
Добротность ускоряющей системы	11200



Как построен процесс работы

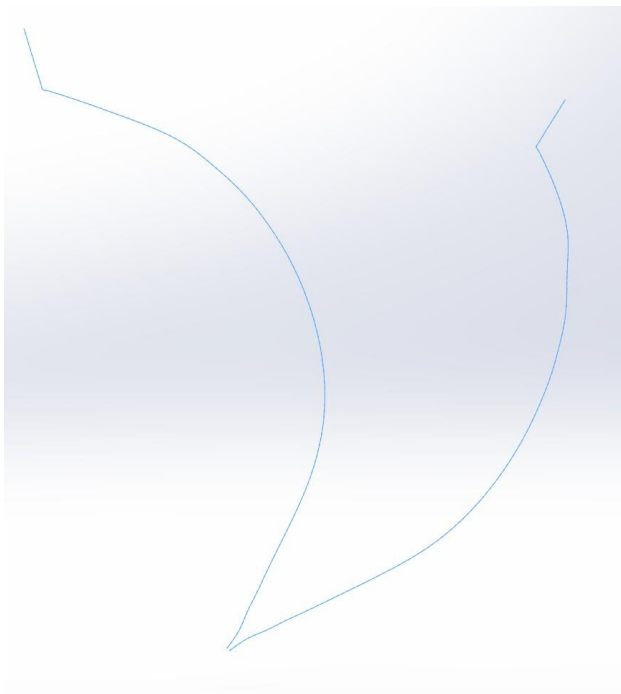
- Параметрическое моделирование резонатора в Solidworks.
- CST Eigenmode solver – расчет по поиску собственной частоту резонатора, добротности, потерь.

Расчет проходил на основе разработанной автором **новой методики** : в CST Studio Suite производилась оценка влияния на частоту и добротность узлов резонатора методом перебора переменных, заданных в параметрической трехмерной модели в Solidworks.

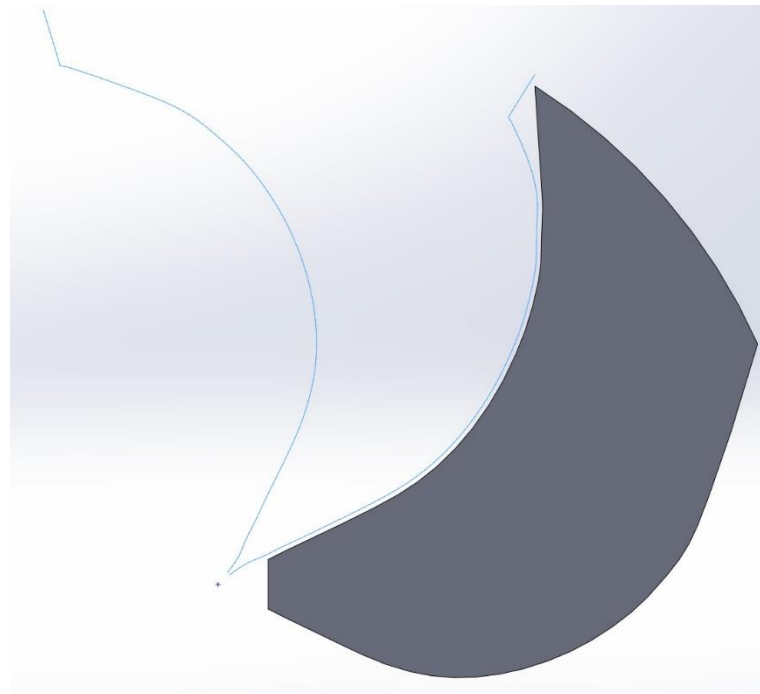
- CST Conjugate heat transfer solver и Solidworks Computational fluid dynamics solver – расчет охлаждения резонатора.
- CST Frequency domain solver – расчет петли связи.



Параметрическое моделирование резонатора



Кривая сектора



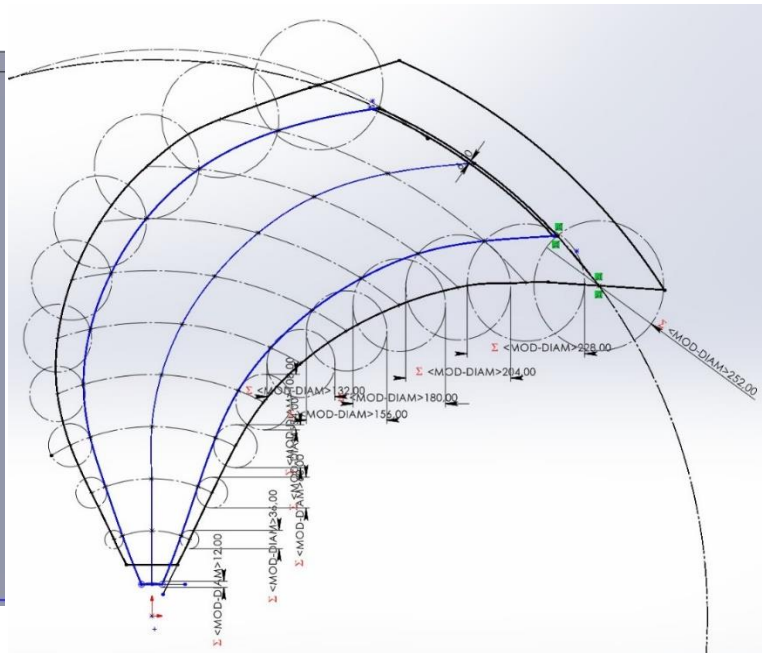
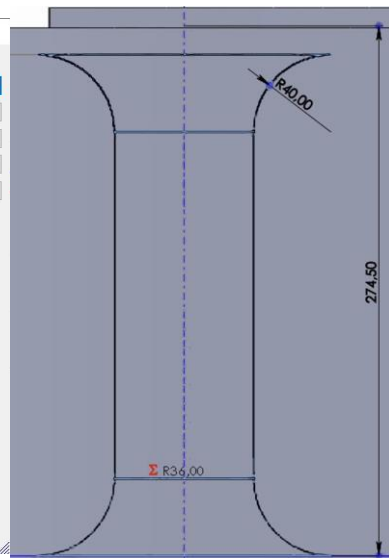
Кривая сектора и резонатор

Параметрическое моделирование резонатора

Уравнения, глобальные переменные и размеры

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	
'stem1_diam'	= 33	33.00	
'stem1_diam'	= 33	33.00	
'half_cav_h'	= 269.5	269.50	
Элементы			
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	

OK
Отмена
Импорт...
Экспорт...
Справка



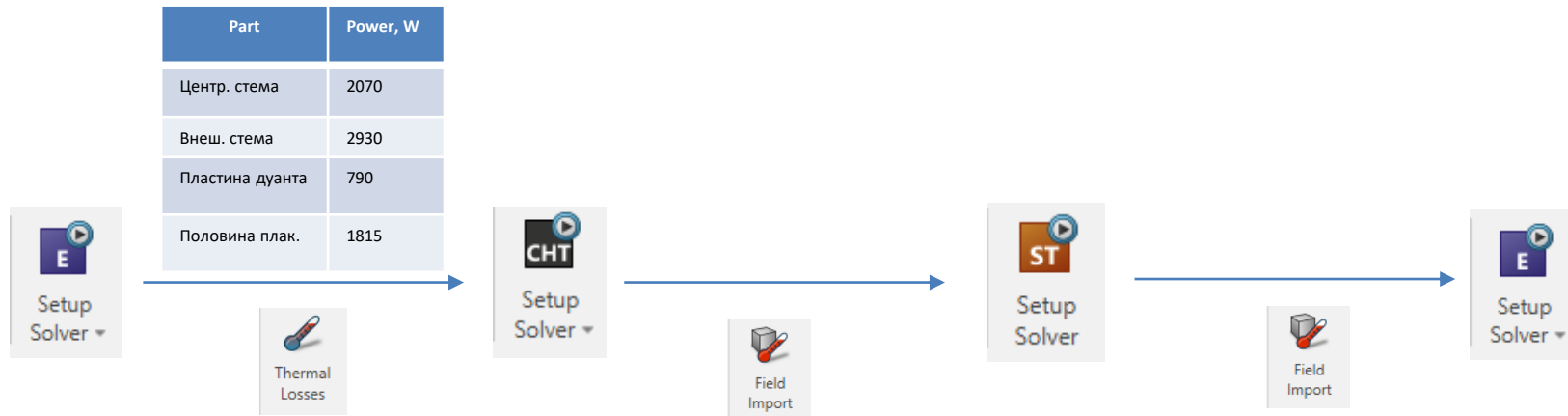


Расчеты

При поисках частоты для оптимизации модели проведена серия следующих расчетов:

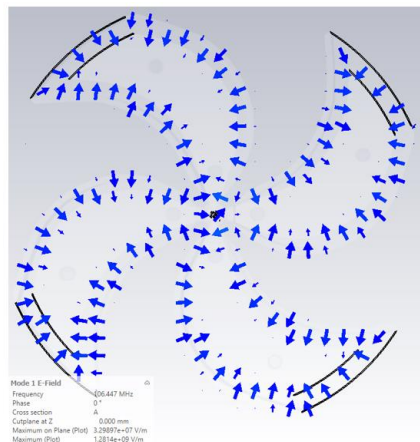
- Расчет влияния внешней (второй от центра) опоры
- Расчет влияния внутренней (первой к центру) опоры
- Расчет влияния толщины пластин дуанта
- Расчет влияния вертикального зазора между пластинами дуанта
- Расчет влияния ширины ускоряющих зазоров на частоту
- Расчет системы охлаждения (определение поверхностных потерь, нагрева узлов резонатора, распределение контуров охлаждения, расчет скорости и объемного потока для каждой трубки и потери давления на выходе)
- Расчет петли связи

Гибридный решатель

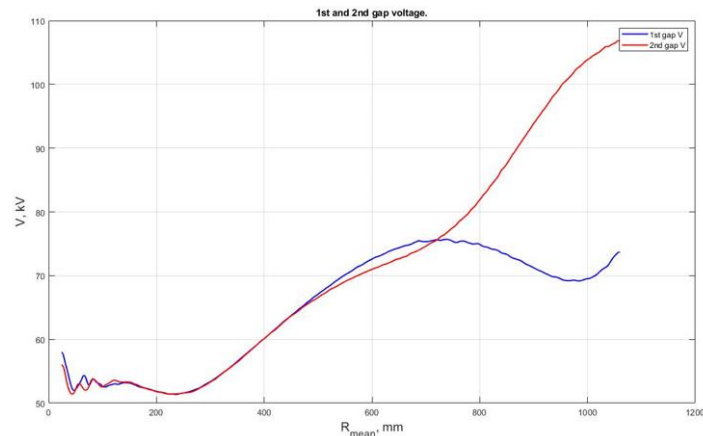
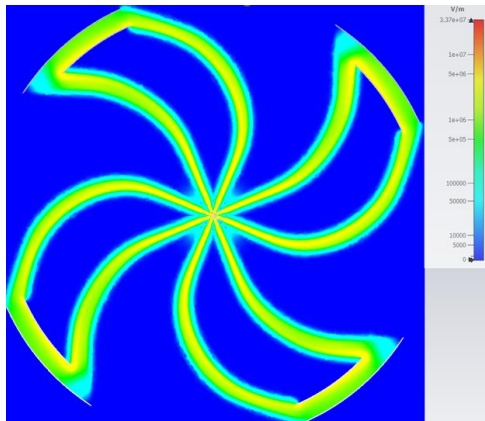


Задача моделирования гибридного решателя обеспечивает возможность подключения высокочастотных решателей через интерфейсы общего назначения. Это позволяет эффективно моделировать многомасштабные задачи с электрически большими и очень сложными структурами, которые невозможно смоделировать иным способом.

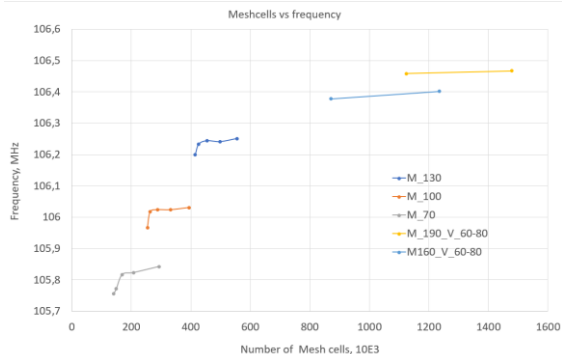
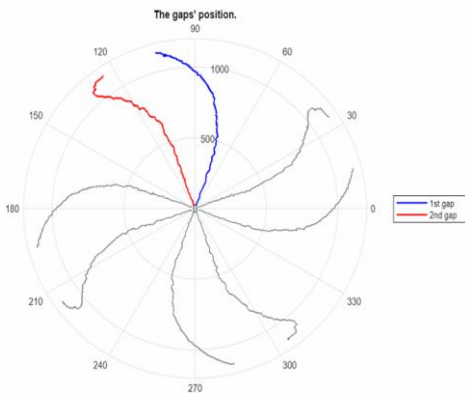
Поиск собственной частоты и распределения напряжения вдоль радиуса

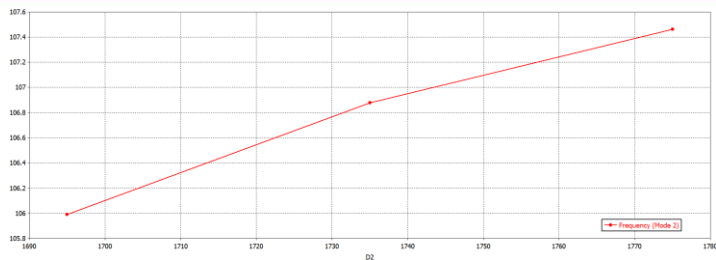


CST Eigenmode solver

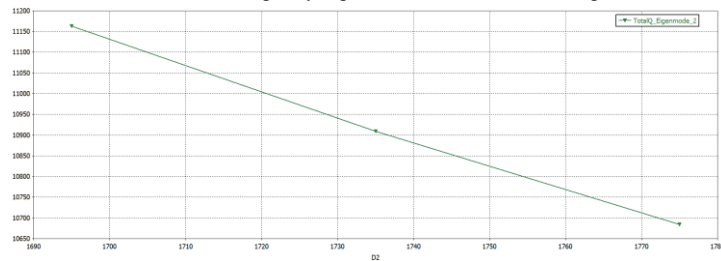


* Малинин В. А. CORD (Closed Orbit Dynamics): программа для анализа карт магнитного и ускоряющего полей в расчетах динамики пучка / В.А. Малинин и др. // Письма в журнал физики элементарных частиц и атомного ядра. - 2021. - Т. 18. - N 4 (236). - С. 393.

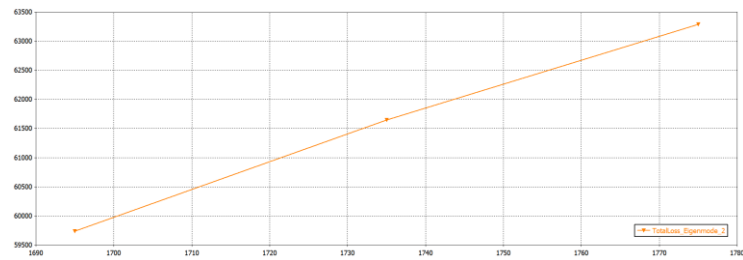




Зависимость частоты от радиуса расположения внешней опоры



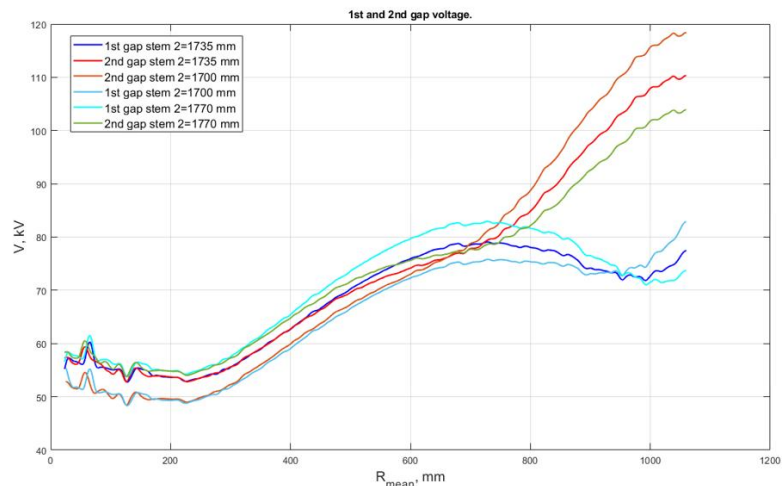
Зависимость добротности от радиуса расположения внешней опоры



Зависимость потерь от радиуса расположения внешней стемы

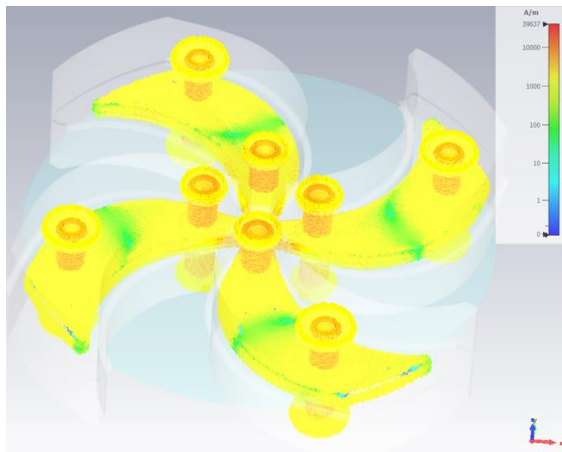
Анализ расположения внешней опоры

3D Run ID	D2	Frequency (Mode 2)	TotalLoss_Eigenmode_2	TotalQ_Eigenmode_2
0: Current ...				
1	1695	105.992	59740.7	11162.4
2	1735	106.878	61645.2	10908.6
3	1775	107.462	63283	10684.7

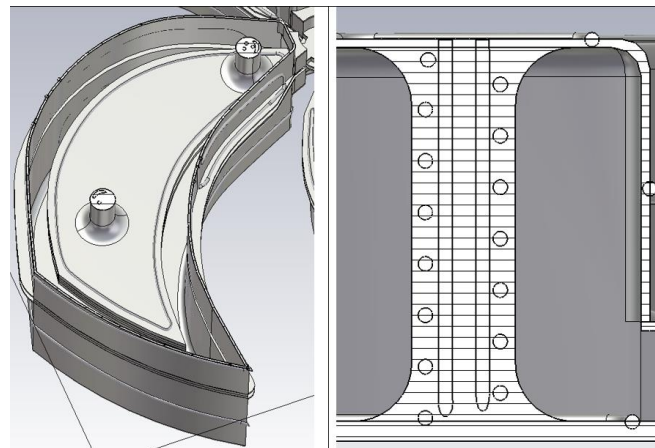
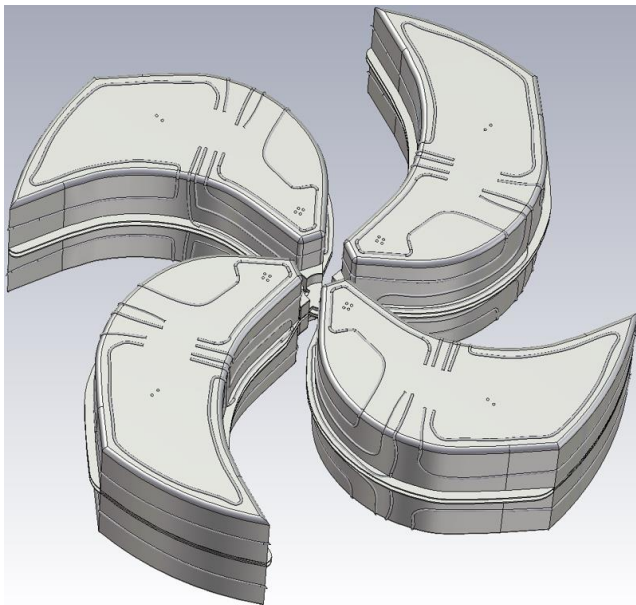


Влияние расположения второй стемы на распределение напряжения в зазоре

Расчет охлаждения резонатора в CST

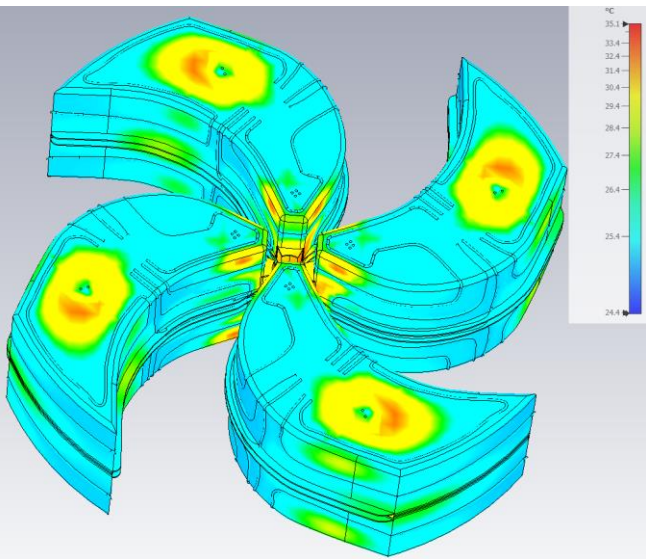


Центральная <u>стема</u>	2070 Вт
<u>Стема</u> на выводе	2930 Вт
Пластина <u>дуанта</u>	790 Вт
Половина плакировки	1815 Вт



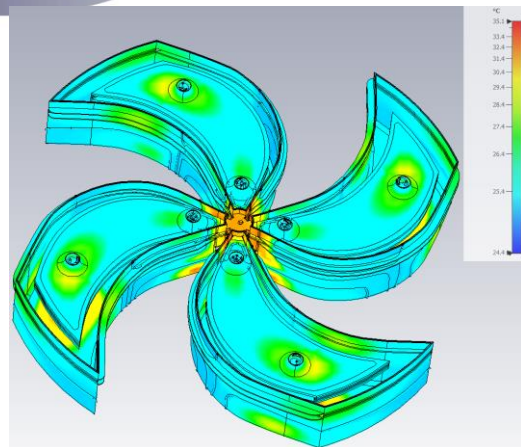
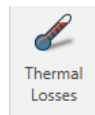
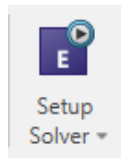
Расчет охлаждения резонатора в CST

CST Conjugate heat transfer solver

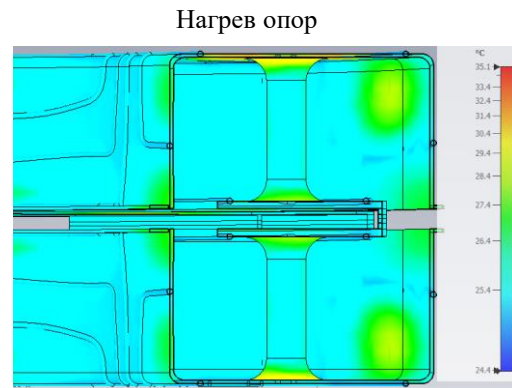


Нагрев плакировки

Центральная <u>стена</u>	2070 Вт
<u>Стена</u> на выводе	2930 Вт
Пластина <u>дуанта</u>	790 Вт
Половина плакировки	1815 Вт



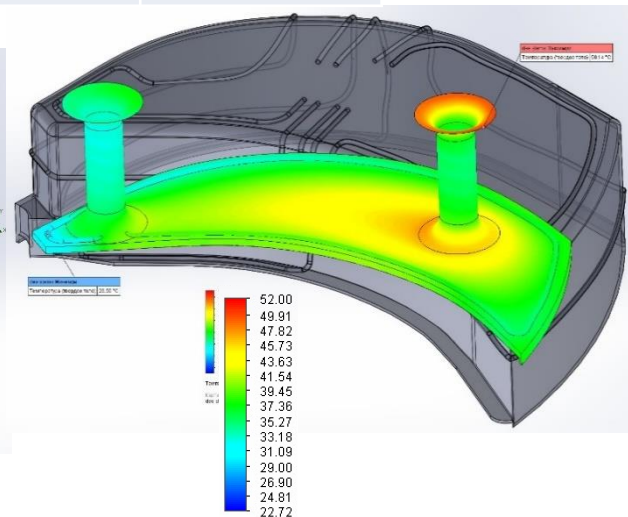
Нагрев пластин дуантов



Нагрев опор

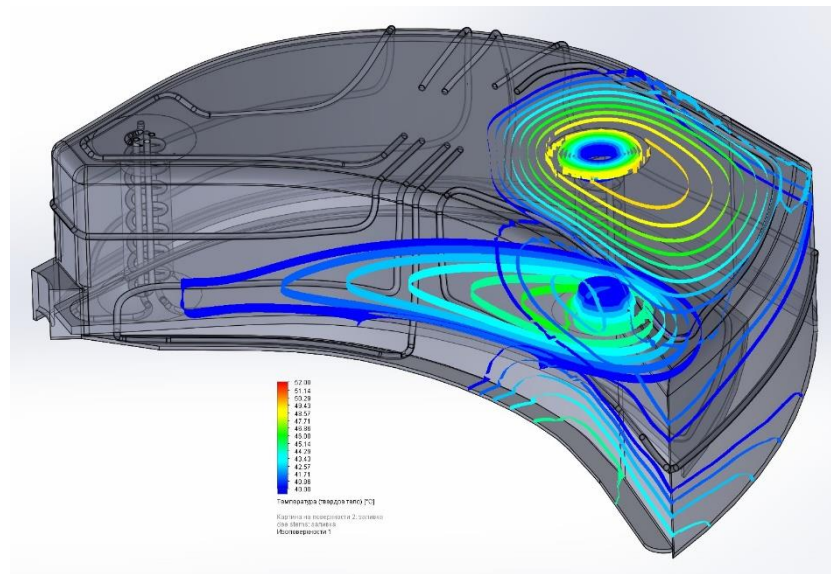
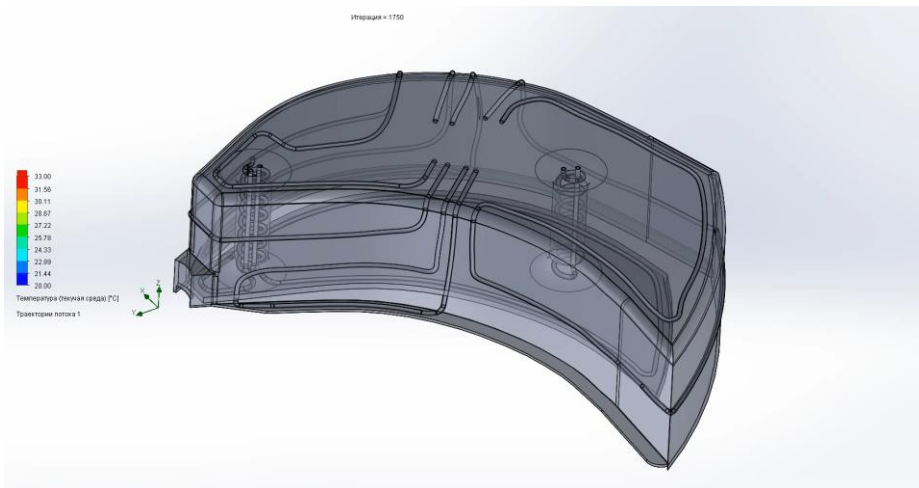
$$V = \frac{P}{c\rho\Delta T}$$

Узел	Потери, Вт +30%	Поток, м³/с
Центральная стема	2690	6,45Е-05
Внешняя стема	3810	9,14Е-05
Пластина дуанта	1030	2,47Е-05
Половина плакировки	2360	5,66Е-05



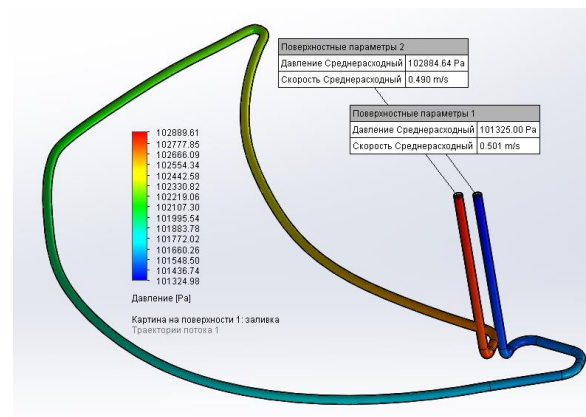
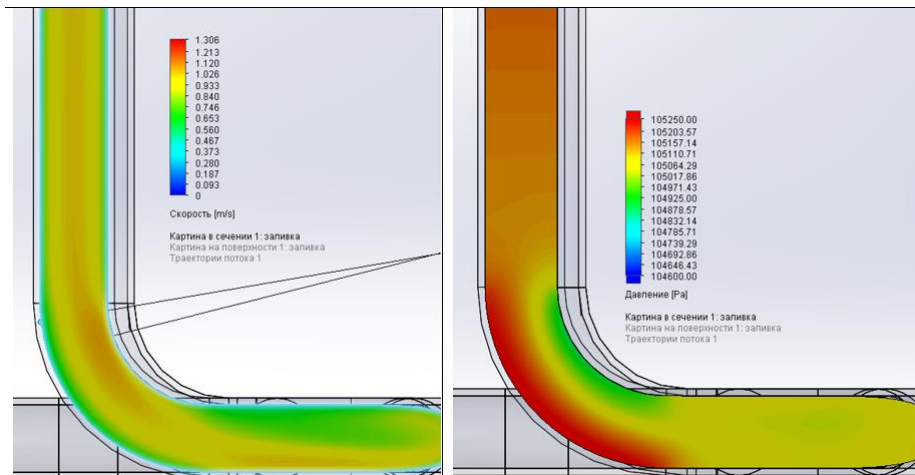
Computational fluid dynamics (FVM)

Расчет охлаждения резонатора в Solidworks

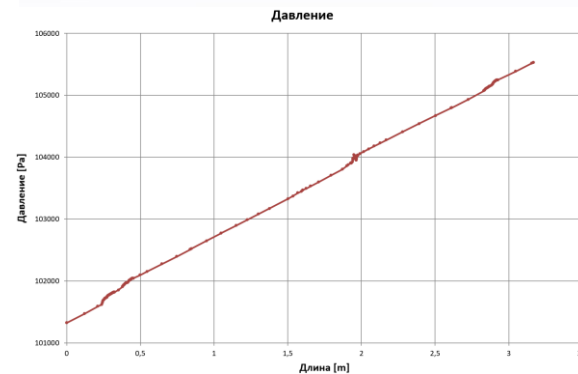


Имя	Текущее значение	Прогресс сходимости	Критерий	Среднее значение
inlet pressure	106144 Pa	Достигнуто (IT = 361)	1134.44 Pa	106156 Pa
inlet velocity	0.869637 m/s	Достигнуто (IT = 361)	8.69637e-09 m	0.869637 m/s
outlet pressure	101717 Pa	Достигнуто (IT = 361)	0.537923 Pa	101717 Pa
outlet velocity	0.872378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

Расчет потери давления трубках охлаждения в Solidworks

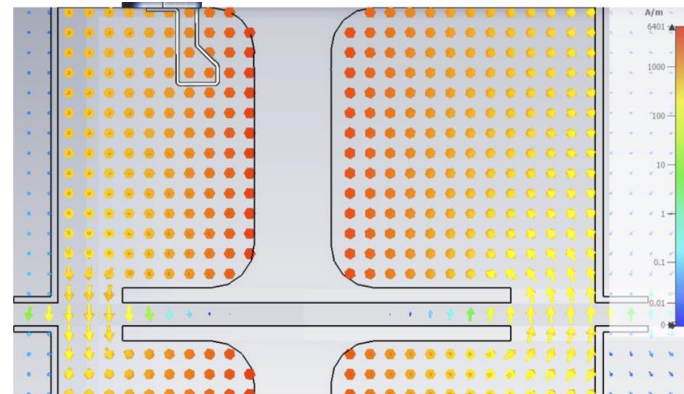
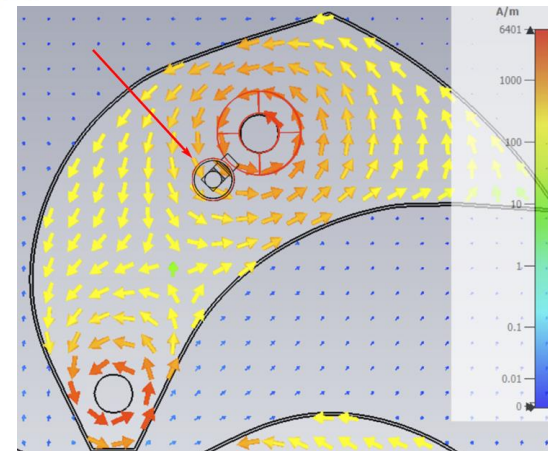
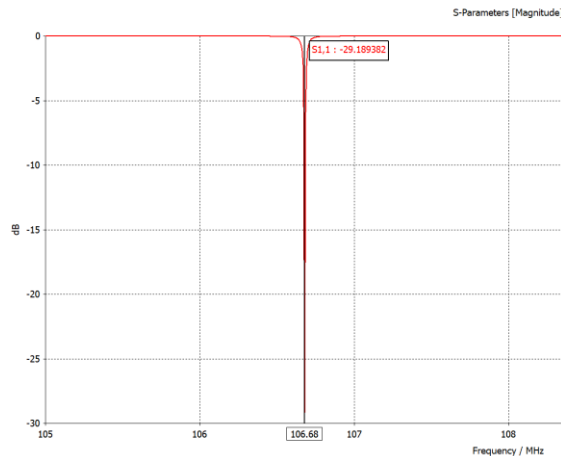
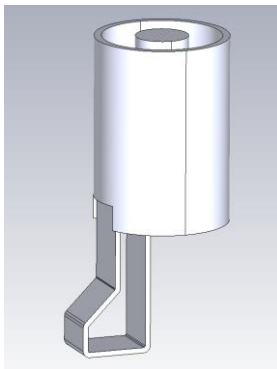


Контур резонансной системы	Потеря давления, Па
1-4 (плакировка)	\
1. центр	427
2. Задняя часть	709
3. <u>Внутр</u> бок	858
4. <u>Внеш</u> бок	698
5 (<u>дуант</u>)	1559
6 (носовая <u>стема</u>)	6141
7 (задняя <u>стема</u>)	6141
Итого по 4 резонаторам	132264





Расчет петли связи и оптимизация сетки





Заключение к главе 4

- 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 оптимизированной системы охлаждения
- Произведен расчет потерь давления в трубах охлаждения
- Предложен способ подстройки резонатора под необходимую частоту посредством обточки внешней стемы.
- Произведен поверочный расчет индуктивной петли связи
- Подготовлено техническое задание для производства ускоряющей системы



Заключение к главе 4

В результате расчетов определены следующие параметры резонатора:

Параметр	Значение
Высота резонатора, мм	561
Расстояние между пластинами дуантов, мм	21
Радиус вывода, мм	1070
Радиус внутренней опоры, мм	66
Радиус внешней опоры, мм	66
Положение внутренней опоры, мм	460
Положение внешней опоры, мм	1760
Толщина пластины дуанта, мм	14
Ширина ускоряющего зазора на радиусе вывода, мм	130
Угловая протяженность резонатора, град	45/27



Резюме

» Актуальность

Многолетний практический опыт лечения онкологических больных протонными пучками в Медико-техническом комплексе (МТК) ЛЯП ОИЯИ создает уникальные условия для разработки инновационных технологий в области протонной терапии. Последние исследования нового многообещающего метода Флэш показали его огромные перспективы для расширения применения протонной терапии на опухоли, ранее не поддающиеся лечению протонами, а также для существенного улучшения качества лечения. Задача исследования Флэш определяет актуальность создания научно-исследовательского инновационного центра, оснащенного современным протонным ускорителем, системой доставки пучка и лабораторным оборудованием для медико-биологических исследований.



Резюме

➤ Актуальность

➤ Научная новизна

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.



Резюме

➤ Актуальность

➤ Новизна

➤ Практическая значимость

- Циклотрон С235 успешно функционирует в городе Димитровграде: только за 8 месяцев 2021 года высокотехнологичную помощь в рамках одного медицинского центра получило более тысячи онкологических пациентов [1] . 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 и гантри. Запуск опытного образца SC200 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.



Резюме

- **Актуальность**
- **Новизна**
- **Практическая значимость**
- **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 C235-V3 и C400 [1] проводилось моделирование резонаторов SC200 и MSC230 с использованием тех же методик.

Достоверность определена успешной работой ускорителя C235 в Димитровграде и пуском SC200.

1. Jongen 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



Резюме

- **Актуальность**
- **Новизна**
- **Практическая значимость**
- **Достоверность**
- **Апробация**

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.

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.

Данные работы, были поддержаны грантами ОИЯИ для молодых ученых и специалистов в 2015 и 2018 годах.



Резюме

- **Актуальность**
- **Новизна**
- **Практическая значимость**
- **Достоверность**
- **Апробация**
- **Личный вклад**

Все результаты, приведенные в работе, получены самим автором или при его непосредственном участии.

Автор принимал участие в сборке, настройке, отладке и запуске ускорителя C235, предназначенного для Федерального высокотехнологичного центра медицинской радиологии ФМБА России города Димитровград.

Автор занимался созданием компьютерных моделей ВЧ резонаторов изохронных циклотронов C235, 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.



Основные результаты, 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 ненагруженной 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 гибкое, быстрое и точное определение характеристик.
- Модель резонатора MSC230, обладающего необходимыми для ускорения пучка характеристиками: рабочей частотой 106,5 МГц, высокой добротностью 11200 (ненагруженной) 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, 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.



Список публикаций по теме диссертации

1. Galina Karamysheva, ..., Semen Gurskiy et al., Динамика пучка в изохронном циклотроне для медико-биологических исследований MSC230 // XXVIII International Conference, <https://indico.inp.nsk.su/event/114/contributions/2810/>, 2023
2. G.A. Karamysheva, ..., S.V. Gurskiy et al., Progress in Design of MSC230 Superconducting Cyclotron for Proton Therapy // CYC2022 Proceedings of the 23rd International Conference on Cyclotrons and their Applications, , Beijing, China, 2022
3. **Karamyshev, O.V., ..., Gurskiy, S.V. et al. // Research and Development of the SC230 Superconducting Cyclotron for Proton Therapy, Physics of Particles and Nuclei Letters, ISSN:1547-4771, Изд.: Pleiades Publishing, Ltd., Vol. 18, N1, pp. 63-74**
4. Karamyshev Oleg, ..., Gurskiy Semion et al. JINR projects of cyclotron for proton therapy // JACoW Publishing, Geneva, Switzerland, <http://accelconf.web.cern.ch/cyclotrons2019/doi/JACoW-Cyclotrons2019-TUB02.html>, 01 Jan 2020
5. Karamysheva, G., ..., Gurskiy, S. et al., JINR PROJECTS of CYCLOTRON FOR PROTON THERAPY // International Conference on Cyclotrons and their Applications (22nd), , Cape Town, South Africa, CYC 2019, pp. 141-144.
6. G. Karamysheva, ..., S. Gurskiy et al., Design of SC230 - the new cyclotron for proton therapy // International Conference on Medical Accelerators and Particle Therapy, OMA consortium, Seville, Spain, <https://indico.cern.ch/event/803528/>, 2019.
7. Karamyshev Oleg, ..., Gurskiy Semion et al. Conceptual Design of the SC230 Superconducting Cyclotron for Proton Therapy // JACoW Publishing, Geneva, Switzerland, <http://accelconf.web.cern.ch/ipac2019/doi/JACoW-IPAC2019-TUPTS059.html>, 01 Jan 2019
8. Karamysheva Galina, ..., Gurskiy Semion et al. Beam Dynamics Simulations in the Dubna SC230 Superconducting Cyclotron for Proton Therapy // JACoW Publishing, Geneva, Switzerland, <http://accelconf.web.cern.ch/ipac2019/doi/JACoW-IPAC2019-TUPTS060.html>, 01 Jan 2019
9. Karamysheva Galina, ..., Gurskiy Semion et al. // Compact Superconducting Cyclotron SC200 for Proton Therapy, JACoW Publishing, Geneva, Switzerland, <https://dx.doi.org/10.18429/jacow-cyclotrons2016-thc03>, 01 Jan 2017
10. Karamysheva Galina, ..., Gurskiy Semion et al. // Present Status of the SC202 Superconducting Cyclotron Project, JACoW, Geneva, Switzerland, <https://dx.doi.org/10.18429/jacow-ipac2017-thpva120>, 01 Jan 2017
11. Karamysheva Galina, ..., Gurskiy Semion et al. // Research and Development of a Compact Superconducting Cyclotron SC200 for Proton Therapy, JACoW, Geneva, Switzerland, <https://dx.doi.org/10.18429/jacow-ipac2016-tupmr016>, 01 Jan 2017
12. Shirkov Grigori, ..., Gurskiy Semion et al. // Hadron Therapy Research and Applications at JINR, <http://accelconf.web.cern.ch/rupac2016/doi/JACoW-RuPAC2016-THYMH02.html>, 01 Jan 2017
13. **M. Syresin, ..., S.V. Gurskii et al. // C235V3 Cyclotron for a Proton Therapy Center to be Installed in the Hospital Complex of Radiation Medicine, Technical Physics. The Russian journal of applied physics, ISSN:1063-7842, Изд.:Pleiades Publishing, Ltd., Vol. 84, N 6, pp. 132-139.**
14. Kostromin Sergey, ..., Gurskiy Semion et al. // Cyclotron C235-V3 for Dimitrovgrad Hospital Center of the Proton Therapy, JACoW, Geneva, Switzerland, <http://accelconf.web.cern.ch/IPAC2014/doi/JACoW-IPAC2014-WEPRI090.html?n=IPAC2014/doi/JACoW-IPAC2014-WEPRI090.html>, 01 Jan 2014
15. **Yves Jongen, ..., Semion Gurskiy et al. RF cavity design for superconducting C400 cyclotron // Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei, Letters, ISSN:1814-5957, eISSN:1814-5973, Изд.:JINR, Publishing Department, Vol.8, N 4 (167), pp. 647-654, 2012**
16. **Yves Jongen, ..., Semion Gurskiy et al. Compact superconducting cyclotron C400 for hadron therapy // Nuclear Instruments and Methods, Изд.:Elsevier, Vol. A624, N A 624, Issue 1, pp 47-53, 2010**



Благодарности

Выражаю глубокую благодарность директору ОИЯИ, доктору физико-математических наук, академику РАН Трубникову Григорию Владимировичу за организацию проекта по разработке циклотрона MSC230, член-корреспонденту РАН Ширкову Григорию Дмитриевичу за организацию сотрудничества с Бельгийской фирмой и Институтом физики плазмы г. Хэфэй (Китай), профессору, доктору физико-математических наук Сыресину Евгению Михайловичу за руководство при работе над проектом C235-V3, начальнику отдела НЭОНУ ЛЯП доктору физико-математических наук Карамышевой Г.А. за внимательное критическое прочтение диссертационной работы. Так же хотелось бы особо поблагодарить Карамышева О.В. за научное руководство и постановку задачи, Долю С.Н. за помощь в работе над текстом, Романова В.М., Синицу А.А. и других сотрудников отдела за поддержку и ряд полезных советов.



Лаборатория
ядерных проблем
им. В. П. Дзелепова



Объединенный
институт ядерных
исследований

Спасибо за внимание

Zoom Конференция

Вы просматриваете экран HFIPS Настройки просмотра

Галина Карамышева HFIPS Григорий Трубинов Hamlet Алексей Земчугов (JINR)

SC200 Superconducting Proton Cyclotron

The cyclotron has ran stably more than 600 hrs.

Участники (7)

- Galina_Karamysheva (B)
- Alexey_Zhemchugov... (Организатор)
- HFIPS
- Grigori_SHIRKOV
- Hamlet
- Oleg_Karamyshev
- Григорий Трубинов

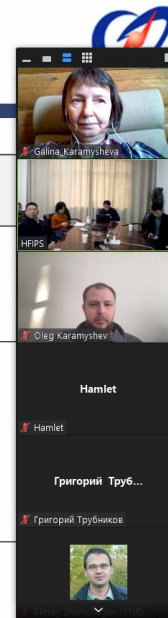
Включить звук Остановить видео Участники Чат Демонстрация экрана Запись Реакция Приложения Выйти

Пригласить Включить свой звук

10:35 22.02.2023

Cyclotron Construction

Cyclotron	Picture	Extracted Particles	Energy	Size	Highest Current
200MeV superconducting cyclotron		Proton	200 MeV	Dia: 2.5m W: 65T	400nA
200MeV superconducting cyclotron (2 sets)		Proton	240 MeV	Dia: 3m W: 75T	>1000nA
14MeV cyclotron (isotope preparation)		Proton	14MeV	Dia: 1.7m W: 16T	80μA





中国科学院等离子体物理研究所
Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Sciences

P.O. Box 1126, Hefei, Anhui, 230033, P.R. China

To the Dissertation council of DLNP JINR

Letter of support for Semion Gurskiy

Semion Gurskiy was a member of the collaboration that started in 2015 between ASIPP (Hefei, China) and JINR (Dubna, Russia). During participation in the SC200 superconducting proton cyclotron project he was involved in designing the RF cavity. It is one of the main and complex parts of SC200. The compact structure of the cyclotron challenged the design of the RF system. The following characteristic parameters of RF cavity had to be found: the working frequency of 90 MHz, correct voltage distribution along the radius with a thorough look in the central and extraction regions, the highest possible value of the quality factor.

The characteristic parameters of the RF cavity had been accomplished based on the simulation and was cross-checked by our team. The results corresponded the physical test measurements and the RF cavity according to the design was created and installed on the cyclotron.

I appreciate the contribution done by Semion Gurskiy and strongly support to confer him the Ph.D. degree.


Dr. Chen Gen
Deputy Director of Plasma Application Research Department
Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Sciences



中国科学院等离子体物理研究所

Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Sciences

P.O. Box 1126, Hefei, Anhui, 230033, P.R. China

To the Qualification Committee of the Joint Institute for Nuclear Research Dubna

Letter of support for Oleg Karamyshev

Oleg Karamyshev has been involved in the ASIPP-JINR bilateral science and technology cooperation on the China-Russia Joint Pilot Superconducting Proton Therapy Facility in Hefei since 2015. The physical design of the isochronous superconducting cyclotron SC200 for proton therapy was presented by Karamyshev Oleg and was approved by International Expert meeting held in 2016. The proton beam from the cyclotron was extracted in 2020, giving the Dubna and Hefei teams valuable experience in cyclotron research and development. The maximum internal beam reached in the cyclotron SC200 was equal to 400nA.

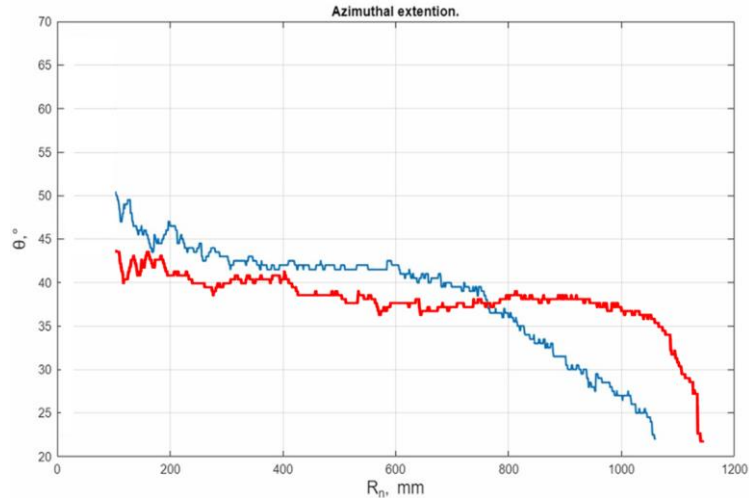
The SC230 cyclotron project for Dubna developed under Oleg's leadership at a higher energy of 230 MeV was also approved at an expert meeting in 2019 in Hefei.

I would like to express my deep satisfaction with the results achieved during our cooperation. I would also like to express the hope that this cooperation will be continued and developed in the future to finally fulfill our humanitarian projects.

I am confident that Oleg Karamyshev is truly qualified to be awarded a Doctor of Science Degree.

Yours sincerely,


Songtao Song
Director General
Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences
P.O. Box 1126, Hefei, China
Tel: +86-551-65597618 Fax: +86-551-65591310
Email: songyt@ipp.ac.cn

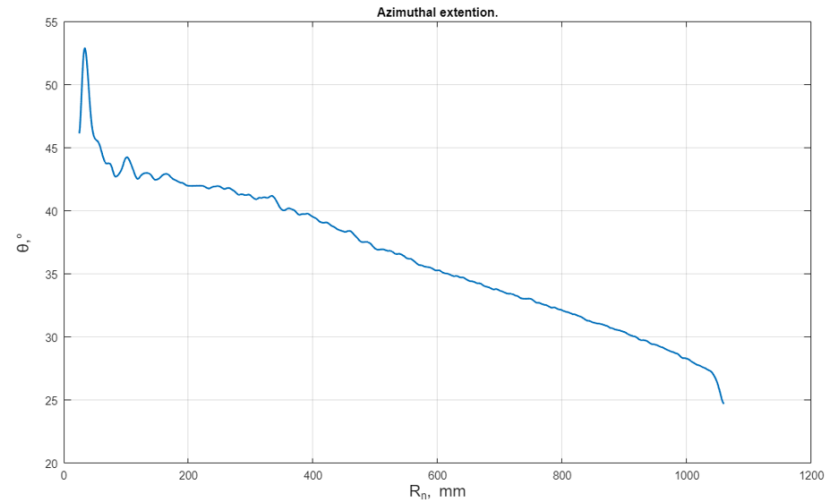


Азимутальная протяженность резонаторов C235 (синий цвет) и MSC230 (красный цвет).

В связи с увеличением размеров криостата произошло увеличение ширины секторов, что повлекло за собой уменьшение угловой протяженности резонатора.

Для сравнения рассмотрим угловую протяженность двух резонаторов, C235 и MSC230.

Как можем видеть на рисунке ниже угловая протяженность резонатора циклотрона MSC230 на радиусе вывода порядка 37 градусов. Увеличение угловой протяженности резонатора на конечных радиусах наряду с двойным увеличением числа резонаторов, несмотря на уменьшение ускоряющего напряжения, приводит к уменьшению числа оборотов пучка в циклотроне до 500 (около 800 в циклотроне C235) для одинаковой мощности системы питания.





Паспорт научной специальности 1.3.18 “Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника”

Направление исследований (физ.-мат.):

4. Формирование и исследование магнитных и электрических полей, необходимых для ускорения пучков заряженных частиц.