

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА ЦИКЛОТРОНА ДЦ-280

*Г. Г. Гульбежан, В. Б. Зарубин, Г. А. Карамышева,
О. В. Карамышев, Й. Франко*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассматривается высокочастотная ускоряющая система разрабатываемого в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований (ЛЯР ОИЯИ) циклотрона ДЦ-280, создаваемого для расширения возможностей и повышения эффективности проведения экспериментов по синтезу и изучению ядерно-физических и химических свойств сверхтяжелых элементов. Изохронный циклотрон тяжелых ионов ДЦ-280 обеспечит получение ускоренных пучков ионов от неона до урана.

В работе представлены результаты предварительного и трехмерного (3D) численного расчетов параметров основного резонатора высокочастотной ускоряющей системы циклотрона ДЦ-280. В результате проведения предварительных расчетов по программе Coaxresonator была выбрана геометрия основного резонатора.

Результаты трехмерного численного моделирования полностью подтвердили правильность предварительных расчетов, в частности, по частоте различие в результате предварительного и трехмерного численного расчетов не превысило 1%. Полученные карты компонент электрического поля применяются в расчетах динамики пучка в циклотроне.

The radio-frequency accelerating system designed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Research (FLNR, JINR), for the DC 280 cyclotron is described. The cyclotron is intended for increasing capabilities and efficiency of experiments on synthesis of superheavy elements and investigation of their nuclear-physical and chemical properties. The DC 280 isochronous heavy-ion cyclotron will produce accelerated beam of ions in the range from neon to uranium.

The results of the preliminary and 3D numerical calculations of the main cavity of this system are reported. The preliminary calculations by the Coaxresonator software have allowed the geometry of the main cavity to be chosen.

The 3D numerical simulation has completely confirmed correctness of the preliminary calculations. For example, the difference in frequency between the preliminary and 3D numerical calculations is no larger than 1%. The electric field component maps obtained from the simulations are used to calculate the beam dynamics in the cyclotron.

PACS: 29.20.db

ВВЕДЕНИЕ

Для расширения возможностей и повышения эффективности проведения экспериментов по синтезу и изучению ядерно-физических и химических свойств сверхтяжелых элементов в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований (ЛЯР ОИЯИ) разрабатывается изохронный циклотрон ДЦ-280 [1]. Циклотрон тяжелых ионов ДЦ-280 обеспечит получение ускоренных пуч-

ков ионов с $A/Z = 4-7$ и массовым числом 20–238, т. е. от неона до урана. Энергия ускоренных пучков будет достигать 4–8 МэВ/нукл., при этом планируемая интенсивность $> 10 \text{ р}\mu\text{А}$ для всех ионов с массовым числом меньше 50.

Такие высокие требования приводят к необходимости создания эффективной высокочастотной ускоряющей системы, расчету которой посвящена настоящая работа.

ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА ЦИКЛОТРОНА ДЦ-280

Ускоряющая высокочастотная (ВЧ) система предназначена для передачи энергии ускоряющего электромагнитного поля ускоряемым частицам.

Для магнита циклотрона ДЦ-280 с четырьмя прямыми секторами на цилиндрическом полюсе электроды ВЧ-системы — дуанты расположены в долинах магнитной структуры. Емкость дуанта является укорачивающей нагрузкой радиальной коаксиальной четвертьволновой линии с ТЕМ-модой колебаний. Ускорение осуществляется на третьей гармонике обращения частиц.

Основной резонатор обеспечивает получение частотного ускоряющего напряжения в диапазоне частот 7,32–10,38 МГц при амплитуде напряжения до 130 кВ. Грубая перестройка частоты резонансной системы (1%) осуществляется изменением длины индук-

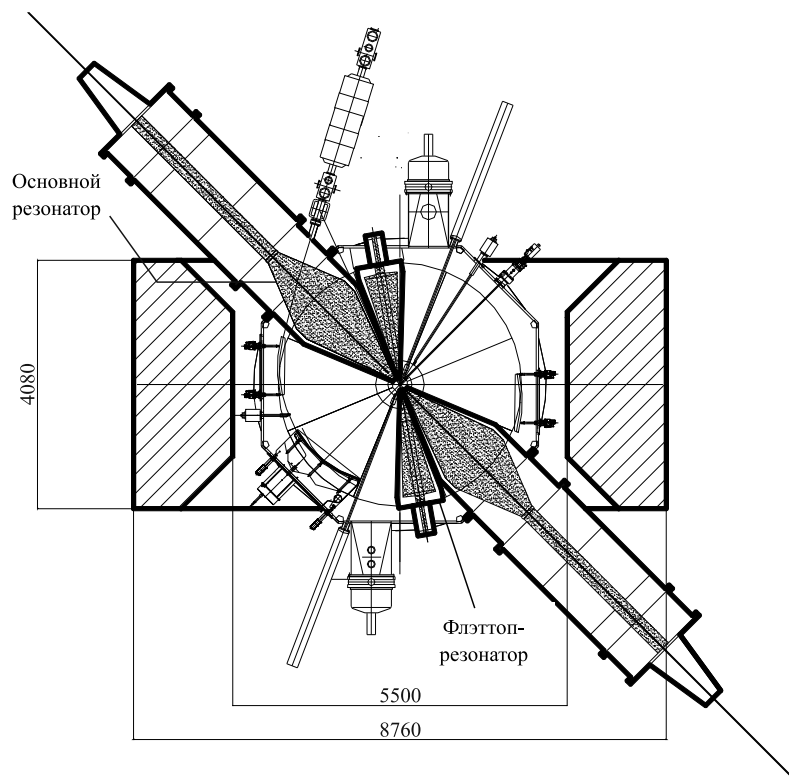


Рис. 1. Расположение основного и флэттоп-резонаторов на схеме циклотрона

тивной части резонатора при перемещении закорачивающей пластины, для плавной будет использоваться триммер в виде короткозамкнутой петли (0,1 %).

Так как при создании циклотрона ДЦ-280 преследуется цель ускорения и вывода тяжелых ионов высокой интенсивности, необходимо обеспечить высокий темп ускорения и высокое качество пучка. Для этого предусматривается создание в диапазоне фаз плоской вершины действия ускоряющих напряжений за счет установки после основных флэттоп-дуантов с угловой протяженностью 20° со своей резонансной структурой, возбуждаемой на девятой гармонике обращения ионов. Максимальное напряжение на флэттоп-дуантах — 13 кВ (рис. 1).

Таким образом, ускоряющая высокочастотная система циклотрона ДЦ-280 образована двумя флэттоп- и двумя основными резонаторами с горизонтально расположенными четвертьволновыми резонансными линиями, системами ВЧ-питания, стабилизации и управления.

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ РЕЗОНАТОРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ УСКОРЯЮЩИХ СИСТЕМ

В разработке высокочастотной ускоряющей системы можно выделить два основных этапа.

Первый этап — проведение предварительных расчетов с целью выбора геометрии, структуры и основных параметров ВЧ-системы. На этом этапе необходимо проведение большого количества расчетов различных вариантов геометрии резонаторов. Это связано с тем, что разработка ускоряющей системы ведется параллельно с выбором конструкции магнитной системы и предварительными расчетами динамики пучка. В процессе проектирования продолжается оптимизация систем, что влечет за собой необходимое изменение геометрии резонаторов.

Для предварительных расчетов резонаторов ускоряющих систем в ЛЯР ОИЯИ была разработана и многократно использовалась при создании или реконструкции компактных циклотронов программа Coaxresonator [2]. В программе используется метод расчета частотных и мощностных параметров неоднородных по длине линий, обеспечивающий достаточную точность и возможность варьирования в процессе расчета геометрии линий для оптимизации их параметров. Программа рассчитывает резонансные ускоряющие структуры в виде укороченной емкостью дуанта радиальной коаксиальной линии, которая разбивается на N однородных участков.

Второй этап — проведение численного расчета выбранной геометрии резонатора по трехмерной программе, предназначенной для расчетов распределения высокочастотного электромагнитного поля и использующей для этой цели метод конечных элементов либо конечных интегралов. Результатом второго этапа являются оптимизация структуры резонатора, точные данные его основных параметров и карты ускоряющего электрического поля, необходимые для проведения численных расчетов динамики пучка в циклотроне.

Расчет основного резонатора ускоряющей системы циклотрона ДЦ-280 был также реализован в двух этапах. В данной работе приведено сравнение результатов, полученных как в предварительном расчете, так и в численном трехмерном расчете.

Сравнение результатов, полученных разными методами, позволяет оценить погрешность и пределы их применимости.

Для численных трехмерных расчетов высокочастотных ускоряющих систем в мире разработано несколько программных комплексов. Ниже приведены характеристики некоторых из них.

CST MICROWAVE STUDIO (CST MWS) [3] — программа для 3D-численного моделирования высокочастотных устройств (антенн, фильтров, резонаторов). Программа CST MWS использует метод конечных интегралов (FIT) — достаточно общий подход, который сначала описывает уравнения Максвелла на пространственной сетке, с учетом закона сохранения энергии, а затем по ним формирует систему специфических дифференциальных уравнений, таких как волновое уравнение или уравнение Пуассона. Метод может быть реализован как во временной, так и в частотной области. Кроме того, не накладывается никаких ограничений на тип используемой сетки разбиения, наряду со структурированной сеткой в декартовой системе координат поддерживаются неортогональные сетки, например, тетраэдральная. Однако метод конечных интегралов во временной области наиболее эффективно работает при использовании прямоугольной сетки разбиения, таким образом, поиск собственных частот осуществляется на простейшей сетке — прямоугольной, что является недостатком при расчетах резонаторов со сложной геометрической формой. Для наших расчетов особенно важна имеющаяся в программе возможность использования аппроксимации для идеальных граничных условий (Perfect Boundary Approximation, PBA).

ANSYS Multiphysics [4] — программа для проведения анализа в широкой области инженерных дисциплин. Программа поддерживает при расчете собственных частот резонаторов неортогональные сетки, а именно тетраэдральную сетку второго порядка, что дает некоторые преимущества перед программой CST MICROWAVE STUDIO при применении в расчетах собственных частот полых резонаторов.

Известная фирма VECTORFIELDS [5] имеет специализированный, для расчетов высокочастотных систем, программный продукт «Concerto», использующий для расчета собственных частот резонаторов метод конечных элементов.

При конструировании высокочастотных ускоряющих систем применение программ трехмерного численного расчета гарантирует получение более точных значений их параметров. В частности, в работе [6] показано, что ошибка определения собственной частоты основного резонатора по программе CST MICROWAVE STUDIO составила около 0,3 %.

Однако сам процесс расчета этими программами является весьма времязатратным — как при подготовке задачи для проведения анализа данной структуры, так и при ее решении. Поэтому так важно на первом этапе проектирования провести синтез геометрии, близкой к рабочей, что возможно при использовании программы Coaxresonator, не требующей больших человеческих ресурсов и компьютерных мощностей.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ ОСНОВНОГО РЕЗОНАТОРА УСКОРЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЦИКЛОТРОНА ДЦ-280

Первым шагом в проектировании резонатора является выбор его геометрии, которая ограничена компоновкой магнита циклотрона. Основные размеры выбранного варианта расчетной модели резонатора представлены на рис. 2.

Основные результаты предварительного расчета резонатора выбранной геометрии представлены в табл. 1 и на рис. 3.

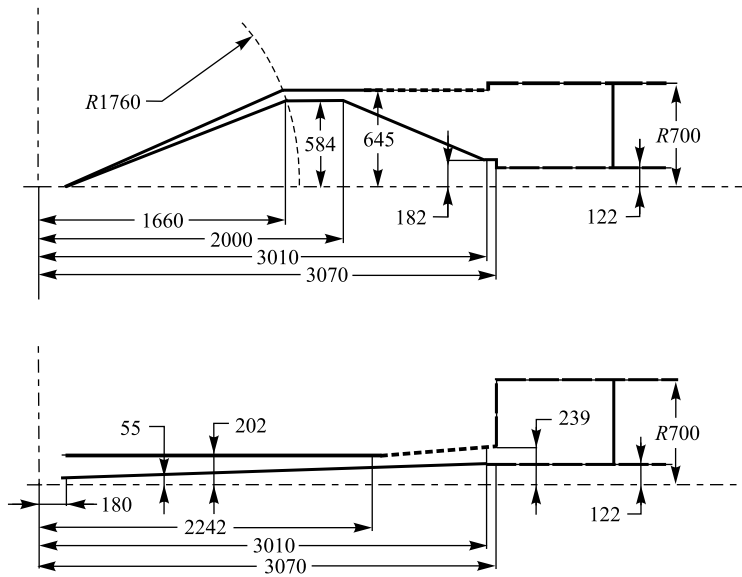


Рис. 2. Геометрическая структура основного резонатора. Разными линиями обозначены его отдельные участки, для которых считается рассеиваемая мощность

Таблица 1. Параметры основного резонатора

Диапазон перестройки частоты резонатора, МГц	7,32–10,38
Азимутальная протяженность дуанта, °	40
Номинальная амплитуда ускоряющего напряжения, кВ	130
Кратность частоты ускоряющего напряжения	3
Максимальная рассеиваемая мощность, кВт	30
Азимутальная ширина ускоряющего зазора, мм	16–62

Апертура дуантов составляет 40 мм. Для увеличения прочности конструкции дуанта высота дуанта выбрана плавно уменьшающейся к центру циклотрона.

В ходе первоначального синтеза геометрии основные параметры, такие как частоты, рассеиваемая мощность, плотность тока и чувствительность частоты от изменения геометрии, были рассчитаны при помощи программы Coaxresonator.

Максимально возможная величина ускоряющего напряжения на дуанте ограничена электрической прочностью его зазоров. Электрическая прочность системы при выбранных зазорах и радиусах закругления определяется известной аналитической аппроксимацией критерия Килпатрика [7, 8]:

$$f [\text{МГц}] = 1,643 \cdot 10^{-2} E_k^2 e^{-85/E_k}.$$

По этому критерию максимальное значение напряженности электрического поля E_k на частоте 7,32 МГц составляет около 50 кВ/см.

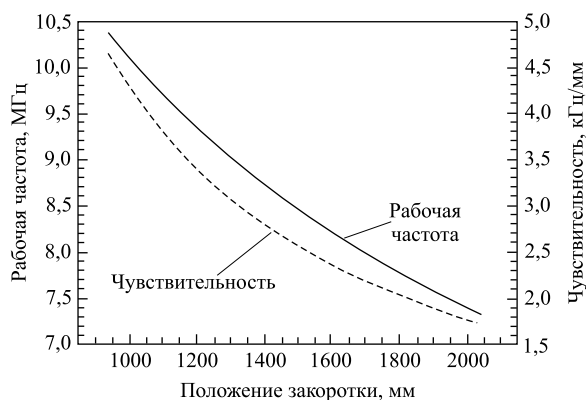


Рис. 3. Зависимость рабочей частоты и чувствительности этой частоты от положения закорачивающей пластины

Напряженность поля на поверхности электродов, обладающих кривизной (1–2 см), примерно в два раза выше средней напряженности в зазоре. Поэтому напряженность поля в медианной плоскости электрического зазора не должна превышать 25 кВ/см.

Из опыта эксплуатации ускоряющих структур циклотронов ЛЯР ОИЯИ в данном диапазоне частот 7–11 МГц средняя предельная напряженность электрического поля в зазоре поперек силовых линий магнитного поля до 90 кВ/см и вдоль этих линий до 30 кВ/см. Последнее значение близко к критерию Килпатрика.

Можно сделать вывод о сильном (в 3–4 раза) изолирующем действии поперечного магнитного поля, что позволит получить необходимое напряжение в 130 кВ в ускоряющем зазоре 1,6 см.

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ РЕЗОНАТОРА, ЧИСЛЕННЫЙ (3D) РАСЧЕТ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ

Для получения более точных значений параметров резонатора и, что не менее важно, оптимизации радиального распределения напряжения на дуантах необходимо проведение численных расчетов с применением специализированных 3D-программ, описанных ранее. Расчетная геометрическая модель основного резонатора была разработана программой SOLID Edge. Вид модели показан на рис. 4.

Так как резонатор обладает симметрией относительно двух плоскостей, достаточно осуществлять расчет четверти резонатора (для обеспечения высокой точности результатов). Модель резонатора необходимо разделить на ~ 3–5 млн элементов.

В результате оптимизации геометрии мы получили резонатор с практически постоянным напряжением ускоряющего поля на дуанте вдоль радиуса (рис. 5). Напряжение на дуанте вычисляли, интегрируя напряженность электрического поля вдоль дуги окружности в медианной плоскости.

Численный (3D) расчет резонатора также позволяет получить пространственное распределение компонент электромагнитного поля, необходимое для последующего моделирования динамики пучка.

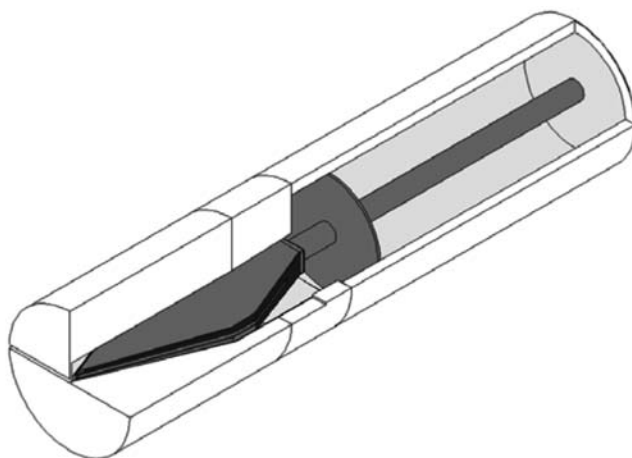


Рис. 4. Расчетная геометрическая модель основного резонатора

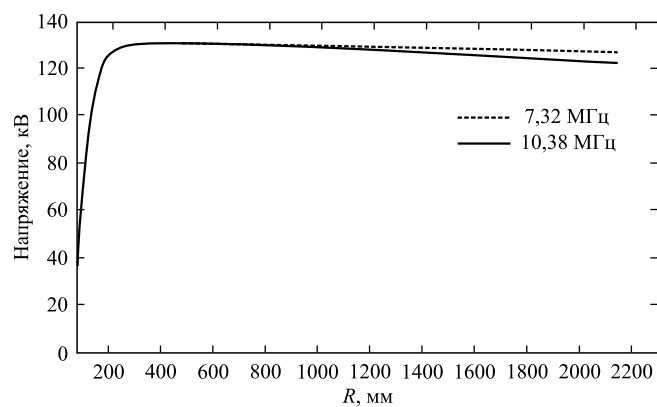


Рис. 5. Зависимость ускоряющего напряжения на дуанте от радиуса циклотрона для двух положений закорачивающей пластины, обеспечивающих проектный частотный диапазон

Таблица 2. Результаты расчетов резонатора

Параметры	Частота 10,38 МГц		Частота 7,32 МГц	
	Расчет Соахresonator	Численный (3D) расчет	Расчет Соахresonator	Численный (3D) расчет
Положение закорачивающей пластины, мм	4010	4010	5120	5120
Суммарная рассеиваемая мощность, кВт	26,0	30,4	19,7	21,8
Добротность	11024	9584	11116	10210
Амплитуда плотности поверхностного тока, А/см	62,0	62,4	46,4	48,5

Расчеты модели резонатора позволили определить плотности поверхностного тока для контактов закорачивающей пластины и ее положение для проектного диапазона частот. Результаты этих и представленных ниже расчетов объединены в табл. 2.

ЧИСЛЕННЫЙ (3D) РАСЧЕТ РАССЕИВАЕМОЙ МОЩНОСТИ

Определение рассеиваемой ВЧ-мощности в резонаторе необходимо для выбора мощности ВЧ-питания и для проектирования системы охлаждения. Кроме того, интересно сравнить расчетные значения, полученные по разным программам. Для конструирования системы охлаждения резонатора важно знать рассеиваемые мощности в узлах с отдельными контурами охлаждения. Для этого модель была разделена на части, соответствующие контурам охлаждения (см. рис. 2).

Для оценки рассеиваемой мощности в резонаторе мы проводили расчет с удельной электропроводностью меди $5 \cdot 10^7$ См/м (техническая медь).

В табл. 2 и 3 приведены параметры резонатора, которые были получены в результате численного (3D) расчета и расчета программой Coaxresonator.

Таблица 3. Рассеиваемые мощности отдельных участков резонатора

Длина резонатора, мм	Часть резонатора	Соaxresonator- расчет, кВт	Численный (3D) расчет, кВт
Частота 10,38 МГц			
Внутренний проводник 0–3070 3070–4010 4010	Дуант	5,580	6,998
	Шток	12,341	12,464
	Закорачивающая пластина	2,840	2,840
Внешний проводник 0–2242 2242–3070 3070–4010	Плакировка	1,174	1,408
	Патрубок	1,940	4,508
	Бак резонатора	2,161	2,190
Суммарно		26,036	30,408
Частота 7,32 МГц			
Внутренний проводник 0–3070 3070–4010 5120	Дуант	2,426	3,063
	Шток	12,448	12,608
	Закорачивающая пластина	1,340	1,340
Внешний проводник 0–2242 2242–3070 3070–5120	Плакировка	0,502	0,602
	Патрубок	0,851	1,991
	Бак резонатора	2,173	2,205
Суммарно		19,740	21,809

Видно, что рассеиваемые мощности, полученные численным (3D) расчетом, несколько больше для обеих частот. В целом результаты этих расчетов отличаются не более чем на 10 %, отличие результатов расчета частоты резонатора не превышает 1 %, что ненамного превышает ошибку численного (3D) расчета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбрана геометрия высокочастотной ускоряющей системы циклотрона ДЦ-280, разрабатываемого в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований.

Результаты численного расчета параметров основного ускоряющего резонатора полностью подтвердили правильность предварительных расчетов, выполненных по программе Соaxresonator, в частности, по частоте различие в результате предварительного и численного расчетов одной и той же модели не превысило 1 %.

Рассчитана мощность потерь для модели с двумя разными положениями закорачивающей пластины (от центра циклотрона) 5120 и 4010 мм, соответствующих требуемому диапазону частот 7,32–10,38 МГц.

По результатам численного расчета для проведения компьютерного моделирования динамики пучка были созданы карты электромагнитных полей в резонаторе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гульбекян Г. Г.* Проект сильноточного циклотрона тяжелых ионов ДЦ-280 // IX Междунар. семинар по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В. П. Саранцева, Алушта, Украина, 17–21 сент. 2011 г.
2. *Гульбекян Г. Г., Иванов Э. Л.* Программа расчета неоднородных коаксиальных резонаторов и ускоряющих систем циклотронов У-400 и ИЦ-100. Сообщ. ОИЯИ 9-87-495. Дубна, 1987.
3. MWS by CST. www.cst.de
4. ANSYS <http://www.ansys.com/>
5. SOPRANO by Vector Fields. www.vectorfields.com
6. *Jongen Y. et al.* RF Cavity Design for Superconducting C400 Cyclotron // Phys. Part. Nucl. Lett. 2011. V. 8, No. 4. P. 386–390.
7. *Kilpatrick W. D.* // Rev. Sci. Instr. 1957. V. 28, No. 10. P. 824.
8. *Thomas P.* Wangler RF Linear Accelerators. Berlin: Wiley-VCH, P. 164.
9. *Calabretta L. et al.* Preliminary Study of the Scent Project. Catania, 2006.

Получено 20 марта 2012 г.