

P9-2005-33

А. А. Глазов, Г. А. Карамышева, О. Е. Лисенкова

**ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА
CUSTOMS-ЦИКЛОТРОНА**

Направлено в журнал «Прикладная физика»

Глазов А. А., Карамышева Г. А., Лисенкова О. Е. P9-2005-33
Высокочастотная ускоряющая система CUSTOMS-циклотрона

Представлены результаты расчетов параметров высокочастотной ускоряющей системы CUSTOMS-циклотрона, предназначенного для обнаружения взрывчатых веществ на базе γ -резонансного метода. После проведения аналитических расчетов была выбрана конструкция высокочастотного резонатора. Результаты трехмерного численного расчета полностью подтвердили правильность аналитических оценок, в частности, по частоте различие в результате аналитического и численного расчетов не превысило 5 %. Полученные карты компонентов электрического поля применяются в расчетах динамики пучка в циклотроне.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2005

Перевод авторов

Glazov A. A., Karamysheva G. A., Lisenkova O. E. P9-2005-33
High Frequency Acceleration System of the CUSTOMS Cyclotron

Results of the analytical and numeric calculations of the High Frequency Acceleration System of the CUSTOMS cyclotron dedicated for explosives detection by nuclear resonance absorption of γ -rays in nitrogen are presented.

The design of the acceleration system was chosen as a result of analytical calculations. Numeric 3D simulation of chosen system confirmed results of analytical estimations with a good agreement ($< 5\%$). Electric field distribution in accelerating gap for beam dynamic simulation was determined.

The investigation has been performed at the Dzhelapov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2005

ВВЕДЕНИЕ

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ разрабатывается проект комплекса по обнаружению взрывчатых веществ [1] на базе γ -резонансного метода [2]. Комплекс состоит из циклотрона, мишенного узла и детектирующего устройства. Обнаружение взрывчатых веществ в рассматриваемом случае основано на детектировании высоких концентраций азота в предметах багажа по резонансному рассеянию либо поглощению γ -квантов, полученных в результате реакции $C^{13}(P, \gamma)N^{14}$. Для получения пучка ускоренных протонов планируется использовать компактный циклотрон с аксиальной инжекцией пучка от внешнего источника, азимутальной вариацией поля и электростатической системой вывода. Преимущества циклотрона заключаются в простоте и технологичности конструкции, небольших габаритах, небольших весах элементов ускорителя. Энергия выведенного пучка протонов составит 1,75 МэВ, ожидаемая величина среднего тока пучка 2–5 мА.

В работе представлены результаты расчетов параметров высокочастотной ускоряющей системы CUSTOMS-циклотрона.

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Разработка высокочастотной ускоряющей системы проходит в два этапа. Первый этап — проведение аналитических расчетов с целью выбора структуры и основных параметров ВЧ-системы. На этом этапе возможно проведение большого количества расчетов для выбора оптимальной конструкции резонатора. Второй этап — проведение численного расчета выбранной геометрии ВЧ-системы по трехмерной программе, предназначенной для расчетов высокочастотного электромагнитного поля и использующей для этой цели метод конечных элементов. Результатом второго этапа являются точные данные основных параметров резонатора и карты ускоряющего электрического поля, необходимые для проведения численных расчетов динамики пучка в циклотроне. Возможность сравнения результатов, полученных разными методами, позволяет оценить погрешность и пределы применимости аналитического метода к исследованию данной ускоряющей системы циклотрона.

1. Аналитические расчеты ВЧ-системы. Ускоряющая высокочастотная система образована двумя резонаторами, состоящими из 45-градусных секторных ускоряющих электродов-дуантов, которые расположены в противоположных долинах полюсов электромагнита, горизонтально расположенными резонансными линиями, системами ВЧ-питания, стабилизации и управления.

Рабочая частота $f = 38,9848$ МГц соответствует четвертой кратности частоты обращения, амплитуда ускоряющего напряжения $V = 60$ кВ.

Набор энергии ионом при пролете в ускоряющем промежутке определяется выражением

$$W = 2VeZg \sin(q\alpha_d/2) \cos \varphi, \quad (1)$$

где V — амплитуда ускоряющего напряжения; eZ — заряд иона; φ — фаза ВЧ-напряжения в момент пересечения ионом середины (оси симметрии) дуанта; $q = F/F_0$ — кратность ускорения; F — частота ускоряющего напряжения; F_0 — частота обращения иона; α_d — угол дуанта; g — фактор времени пролета в ускоряющем промежутке; $g = \frac{\sin(q\alpha_g/2)}{q\alpha_g/2}$; α_g — угол ускоряющего промежутка.

Из выражения (1) следует, что максимальный набор энергии обеспечивается в случае $q\alpha_d = \pi$, таким образом, выбранная азимутальная протяженность дуанта — 45° является оптимальной для четвертой кратности ускорения.

Особенностью ускоряющей системы разрабатываемого циклотрона являются малые размеры ускоряющего электрода по отношению к длине волны ускоряющего напряжения, равной $7,695$ м. В таком случае реально отсутствует распределение напряжения по электроду и его с достаточной точностью можно рассматривать как сосредоточенную емкость C_d .

Зазор в долинах магнита составляет 40 см, однако зазор между катушками равен $27,3$ см. С учетом конструкции он может сократиться до $25,3$ см, и, если считать, что толщина стенок наружной трубы резонансной линии составляет 5 мм, целесообразно уменьшить ВЧ-зазор до 24 см, что будет соответствовать максимальному внутреннему диаметру D_1 резонансной линии, расположенной внутри магнита до внешнего радиуса катушки (55 см).

Высота дуанта выбрана равной 5 см, из которых 3 см — апертура. Наружный радиус равен 34 см. Общий вид резонатора и Δ -электрода показан на рис. 1.

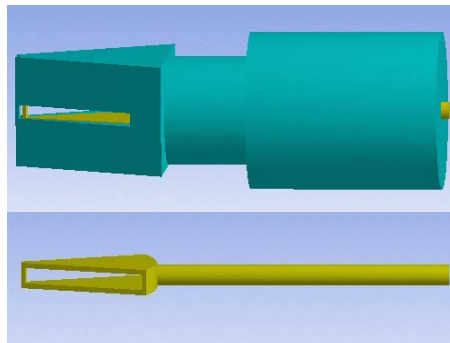


Рис. 1. Вид резонатора и Δ -электрода

Емкость дуанта образуется из емкости крышек, ускоряющих зазоров и емкости передней и задней стенок. Емкость крышек определялась как емкость плоского конденсатора. Для расчета боковых емкостей использовались выражения для взаимной емкости поверхностей, как лежащих в одной плоскости, так и ортогональных. Эти емкости выражаются отношением полных эллиптических интегралов первого рода, аргументы которых, в свою очередь, определяются геометрическими характеристиками зазоров.

Оказалось, что основной вклад в емкость дуанта вносит ускоряющий зазор (емкость на противодуантную рамку и стенку камеры). Суммарная емкость дуанта составляет ~ 65 пкФ при ускоряющем зазоре в 1 см и 55 пкФ при зазоре 2 см.

Расчеты резонансной линии проводились для следующих значений емкости дуанта и наружного диаметра внутренней трубы:

$$C_d = 55 \text{ пкФ}, d = 4 \text{ см и } C_d = 65 \text{ пкФ}, d = 5 \text{ см.}$$

Поскольку предполагается компактность ускорителя, в качестве ограничительного выбрано предположение о том, что резонансная линия не должна выступать более чем на 30 см за габариты магнита.

Рассмотрены различные варианты резонансных линий как однородных, так и состоящих из двух участков — внутри (первая ступень) и вне (вторая ступень) обмотки магнита, — удовлетворяющих ограничительному условию

Таблица

Количество резонаторов	2
Резонансная частота, МГц	38,98
Длина ВЧ-волны, м	7,695
Азимутальная протяженность, °	45
Ускоряющее напряжение, кВ	60
Мощность потерь, кВт	5–5,5
Ширина ускоряющего зазора, см	1
Дуант	
Высота дуанта, см	5
Апертура, см	3
Внешний радиус, см	34
Резонансная линия	
Диаметр первой ступени D_1 , см	24
Длина первой ступени, см	21
Диаметр второй ступени D_2 , см	35
Длина второй ступени, см	45
Диаметр внутренней трубы d , см	4

и вписывающихся в габариты магнитной системы. Оказалось, что ограничительному условию хорошо удовлетворяют двухступенчатые резонансные линии с увеличенным до $D_2 = 35$ см диаметром наружной трубы вне катушек (вторая ступень).

Суммарная мощность потерь лежит в диапазоне 5–5,5 кВт. Максимальная плотность тока в закоротке не превышает 75 А/см, что вполне допустимо.

Следует заметить, что при использовании магнита со сплошным ярмом во второй ступени резонатора может использоваться линия с прямоугольным сечением внешнего электрода.

Параметры выбранного варианта высокочастотной системы представлены в таблице.

Электрическая прочность системы при выбранных зазорах и радиусах закругления представляется достаточной. По критерию Килпатрика зазор в 1 см допускает напряженность электрического поля на частоте 39 МГц в 100 кВ/см, в то время как напряженность поля на кромках дуанта с радиусом 5 мм не будет превышать 80 кВ/см.

2. Компьютерная модель ВЧ-системы. Для численных расчетов использовалась конструкция ВЧ-резонатора, признанная оптимальной на первом этапе моделирования (см. рис. 1 и табл.). На рис. 2 показана модель резонатора с наложенной расчетной сеткой. Так как резонатор обладает осевой симметрией, проводился расчет половины резонатора (для обеспечения максимальной точности результатов). Модель резонатора была разделена на ~ 1 млн элементов (это максимальное число разбиений, которое допускает имеющийся в нашем распоряжении компьютер (AMD Athlon, 2,7 ГГц, объем оперативной памяти 1024 Мб). Расчет занимает около двух часов, ограничение на количество элементов разбиения связано с недостаточным объемом оперативной памяти. Заметим, что на рис. 2 изображена сетка с существенно меньшим количеством элементов ($\sim 100\ 000$), так как качественно показать модель резонатора, состоящую из миллиона элементов, не представляется возможным.

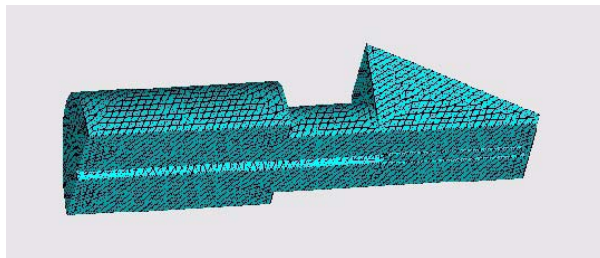


Рис. 2. Компьютерная модель резонатора

Результаты численного расчета полностью подтвердили правильность аналитических оценок параметров высокочастотного резонатора, в частности, по частоте различие в результате аналитического и численного подходов не превысило 5%.

Конечной целью проведения численных расчетов резонатора является получение пространственного распределения компонент электрического поля, необходимого для последующего моделирования динамики пучка. На рис. 3 представлено распределение электрического поля в медианной плоскости. Рис. 4 показывает распределение E_φ -, E_r -, E_z -компонент электрического поля (в цилиндрической системе координат) в зависимости от радиальной координаты для середины ускоряющего промежутка в медианной плоскости.

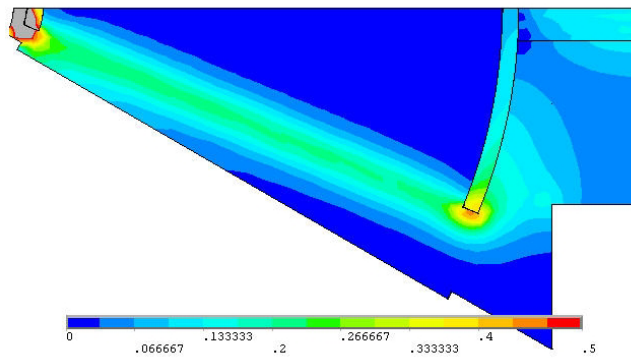


Рис. 3. Распределение электрического поля

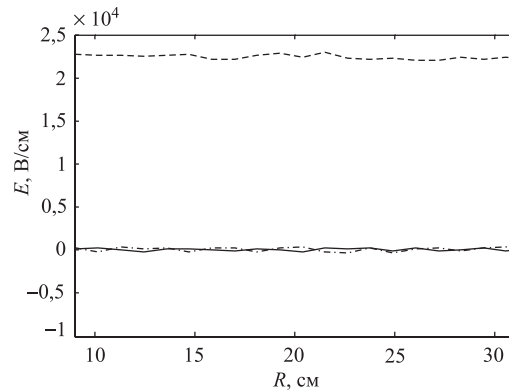


Рис. 4. Зависимости составляющих электрического поля E_φ , E_r , E_z от радиуса: пунктирная линия — E_φ ; сплошная — E_r ; штрихпунктирная — E_z

На первом этапе компьютерного моделирования движения частиц в циклотроне ускоряющее электрическое поле нередко представляется в виде аналитических формул, таких как, например, в работе [3]. Для определения границы применимости аналитического представления электрического поля авторы сравнили результаты численного расчета с аналитическим приближением.

Рис. 5 демонстрирует рассчитанное численно (показано штриховой линией) и аналитически [3] (показано сплошной линией) распределение азимутальной E_φ (в медианной плоскости) и аксиальной E_z (на расстоянии 1 см от медианной плоскости) компонент электрического поля в ускоряющем промежутке на радиусе 30 см.

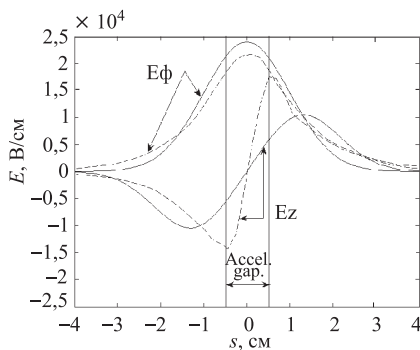


Рис. 5. Распределение азимутальной E_φ и аксиальной E_z составляющих электрического поля в ускоряющей щели резонатора (численный (пунктир) и аналитический (сплошная линия) расчет)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения аналитических расчетов была выбрана конструкция высокочастотного резонатора для ускорения ионов в CUSTOMS-циклотроне, предназначенном для обнаружения взрывчатых веществ. Результаты численного расчета параметров резонатора полностью подтвердили правильность аналитических оценок, в частности, по частоте различие в результате аналитического и численного расчетов не превысило 5%. Однако для представления ускоряющего поля при проведении компьютерного моделирования динамики пучка лучше использовать результаты численного расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Onischenko L. M. et al. Development of compact cyclotron for explosives detection by nuclear resonance absorption of gamma-rays in nitrogen // RUPAC-2004. Dubna, 2004.

2. *Vartsky D. et al.* A method for Detection of Explosives based on Nuclear Resonance Absorption of Gamma-rays in ^{14}N // SPIE Conference on Substance Detection Systems, Proc. SPIE V. 2092. Innsbruck, Austria, October 1993. P. 307–313.
3. *Hazewindus N. et al.* The Magnetic Analogue Method as Used in the Study of a Cyclotron Central Region // NIM. 1974. V. 118. P. 125.

Получено 22 марта 2005 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 7.07.2005.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,68. Уч.-изд. л. 0,96. Тираж 270 экз. Заказ № 54955.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/