

8. густ. — М.: ВЭИ-ТРАВЭК, 2003. Т. 3. С. 88—92.

9. Алмазов В. А., Бурцев Э. Ф., Васильев В. Р., Крупенин Н. В. Высоочастотные импульсные электрические разряды на изоляционных барьерах (частичные разряды) в силовой электротехнике// Прикладная физика. 2004. № 4. С. 60—66.

10. Элементарный учебник физики/ Под ред. Г. С. Ландсберга. Т. 2. Изд. второе. — М.: ГИФМЛ, 1958. — 448 с.

11. Бурцев Э. Ф. Возможность разработки мощного высоковольтного генератора импульсов тока радиодиапазона. "Электротехника 2010": VIII Симпозиум// Сб. докл. Май. — М., 2005. № 1. 20. С. 57.

12. Богородицкий Н. П., Волокобинский Ю. М., Воробьев А. А. и др. Теория диэлектриков. — М.: Энергия, 1965. — 344 с.

Статья поступила в редакцию 5 сентября 2005 г.

Forming the powerful high-voltage current pulses of the short-wave radio-frequency range

V. A. Almazov, E. F. Burtsev

All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

Investigated have been experimentally the relaxation harmonic oscillations of current and voltage pulses of a high frequency (~20—30 MHz) at charging the electrical condenser by high-voltage pulses (~22 kV) with high speeds of increase ($dU/dt \approx 1,3 \cdot 10^{12}$ V/s). It is shown that the methods of quantization of electrical and magnetic energy at frequencies of tens of MHz have ensure the translation of a high-voltage winding in the autotransformer mode with multiple magnification of voltage output. On this basis, the analysis has been made for Nicola Tesla experiments on off-wire transfer of electrical energy over long distances.

УДК 621.3.038.625

Высоочастотная ускоряющая система CUSTOMS циклотрона

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

Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

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

В лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) разрабатывается проект комплекса по обнаружению взрывчатых веществ [1] на базе гамма-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 массах элементов ускорителя. Энергия вы-

веденного пучка протонов составит 1,75 МэВ, ожидаемая величина среднего тока пучка — 2—5 мА.

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

Разработка высокоочастотной ускоряющей системы

Данная разработка проходит в два этапа. Первый — проведение аналитических расчетов с целью выбора структуры и основных параметров ВЧ-системы. Во время этого этапа 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 высоко-

частотного 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.

Аналитические расчеты ВЧ-системы

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

Рабочая частота $f = 38,9848$ МГц соответствует 4-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 $q\alpha = \pi$ таким образом, что выбранная азимутальная протяженность дуанта 45° является оптимальной для четвертой кратности ускорения.

Особенность ускоряющей системы разрабатываемого циклотрона — 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.

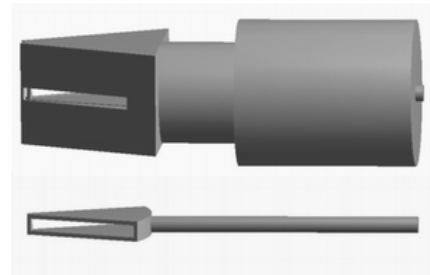


Рис. 1. Вид резонатора и Δ -электрода

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 1-го 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: $C_d = 55$ пкФ, $d = 4$ см и $C_d = 65$ пкФ, $d = 5$ 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 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 ниже:

Количество резонаторов...	2
Резонансная частота, МГц.....	38,98
Длина ВЧ-волны, м.....	7,695
Азимутальная протяженность, град.....	45
Ускоряющее напряжение, кВ.....	60
Мощность потерь, кВт.....	5—5,5
Ширина ускоряющего зазора, см.....	1
Дуант, см:	
высота.....	5
апертура.....	3
внешний радиус.....	34
Резонансная линия, см:...	
диаметр первой ступени D_1	24
длина первой ступени.....	21
диаметр второй ступени D_2	35
длина второй ступени.....	45
диаметр внутренней трубы d	4

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 краях дуанта с радиусом 5 мм не будет превышать 80 кВ/см.

Компьютерная модель ВЧ-системы

Для численных расчетов использовалась конструкция ВЧ-резонатора, признанная оптимальной на первом этапе моделирования (см. рис. 1 и параметры выбранного варианта). 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 2 ч, ограничение на количество элементов разбиения связано с недостаточным объемом оперативной памяти. Заметим, что на рис. 2 изображена сетка с существенно меньшим количеством элементов (~100 000), так как качественно показать модель резонатора, состоящую из 1 млн элементов, не представляется возможным.

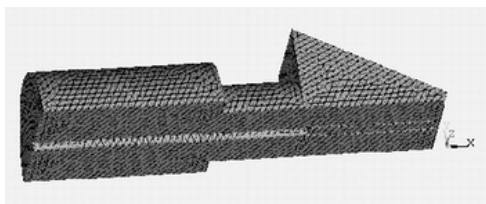


Рис. 2. Компьютерная модель резонатора

Результаты численного расчета полностью подтвердили правильность аналитических оценок параметров ВЧ-резонатора, в частности, по частоте различие в ре-

зультате аналитического и численного подходов не превысило 5 %.

Конечная цель проведения численных расчетов резонатора — получение пространственного распределения компонент электрического поля, необходимого для последующего моделирования динамики пучка. На рис. 3 представлено распределение электрического поля в медианной плоскости.

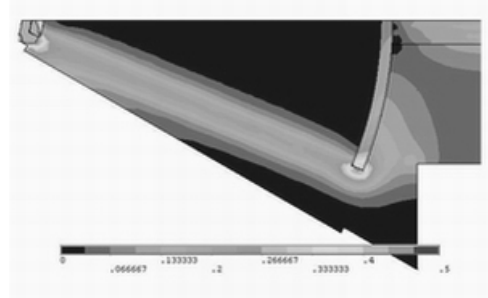


Рис. 3. Распределение электрического поля

На рис. 4 показано 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.

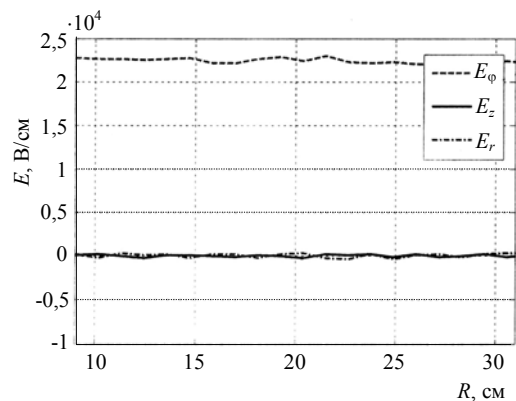


Рис. 4. Зависимости составляющих электрического поля E_φ , E_r , E_z от радиуса

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.

На рис. 5 показано рассчитанное численно (штриховая линия) и аналитически [3] (сплошная линия) 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.

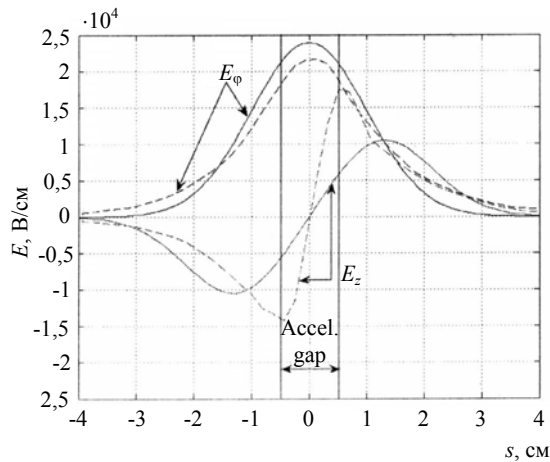


Рис. 5. Распределение азимутальной E_ϕ компонент и аксиальной E_z составляющих электрического поля в ускоряющей щели резонатора (---- — численный расчет; — — аналитический расчет)

З а к л ю ч е н и е

В результате проведения аналитических расчетов была выбрана конструкция ВЧ-резонатора для ускорения ионов в CUSTOMS циклотроне, предназначенном для обнаружения взрывчатых веществ. Результаты чис-

ленного 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.

Л и т е р а т у р а

1. Onishenko L. M. et al. Development of compact cyclotron for explosives detection by nuclear resonance absorption of gamma-rays in nitrogen, this conference. 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. Insbruck. 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. № 118. P. 125.

Статья поступила в редакцию 13 апреля 2005 г.

High frequency acceleration system of the CUSTOMS cyclotron

A. A. Glazov, G. A. Karamysheva, O. E. Lisenkova
Joint Institute for Nuclear Researches, Dubna, Russia

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 adreement ($< 5\%$). Electric field distribution in accelerating gap for beam dynamic simulation was determined.

* * *