

P9-2002-169

В. В. Калиниченко, Г. А. Карамышева

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
УСКОРЯЮЩЕГО ПОЛЯ И ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ  
В ЦИКЛОТРОНЕ-ИНЖЕКТОРЕ  
ДЛЯ ФАЗОТРОНА ОИЯИ**

Направлено на XVIII Конференцию  
по ускорителям заряженных частиц,  
Обнинск, 2002 г.

## **Введение**

В работе представлены результаты 3 - мерных численных расчётов электромагнитных полей высокочастотного резонатора, а также динамики частиц с учётом полученного поля в сильноточном циклотроне на конечную энергию 5 МэВ, предназначенном для инъекции в фазотрон ОИЯИ. В циклотроне предполагается ускорять пучки с величиной среднего тока до 30мА, поэтому при моделировании движения ионов учитывались эффекты пространственного заряда.

## **Расчёты резонатора**

Теория высокочастотных электромагнитных колебаний базируется на системе уравнений электромагнитного поля (системе уравнений Максвелла) в её полном виде (см., например, систему уравнений 1.58, приведённую в работе [1]). Численное решение этой системы уравнений позволяет исследовать высокочастотные резонансные системы, применяемые, в частности, в циклотронах. Крайне важным при проектировании циклотрона представляется знание реального распределения электрического поля в ускоряющей системе, что возможно при проведении численных трёхмерных расчётов ВЧ-полей.

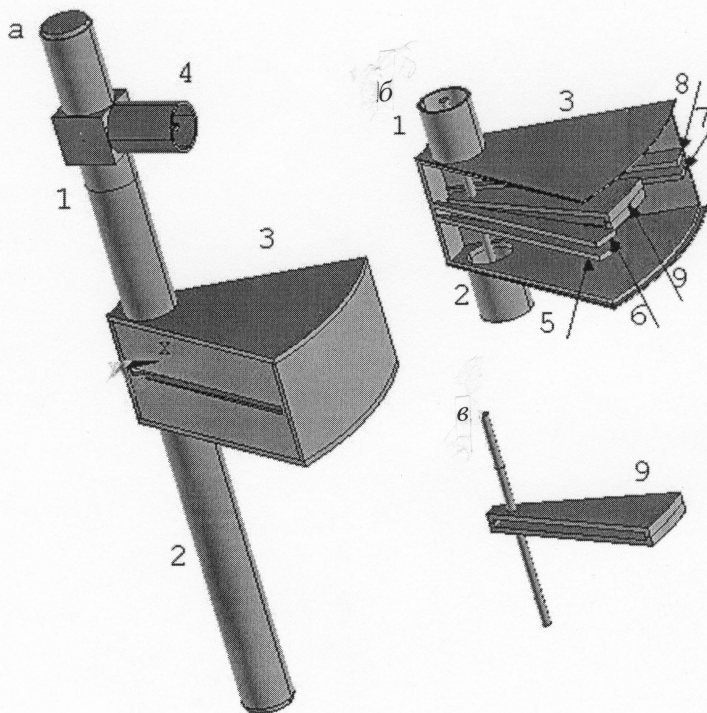
В циклотроне СИ-5 планируется использовать полуволновой резонатор, упрощённая конструкция которого показана на рис.1. Прототипом ускоряющей системы является система, разработанная ранее для циклотрона-инжектора ЦИ-10 [2]. Резонатор содержит короткозамкнутые отрезки коаксиальных линий 1 и 2, корпус 3, в котором размещены ускоряющий  $\Delta$ -электрод и две “рамки”, а также отрезок коаксиальной линии 4 для возбуждения резонатора. Здесь же на рис 1б показаны элементы, находящиеся внутри корпуса 3: 5,6 – элементы первой “рамки”, 7,8 – элементы второй “рамки”, 9 –  $\Delta$ -электрод. Для обеспечения возможности “заглянуть” внутрь корпуса 3 вырезаны две его боковые стенки. Кроме того, для уменьшения размера чертежа коаксиальные линии 1 и 2 обрезаны вблизи соответствующих стенок корпуса 3. Отдельно (рис.1в) показан  $\Delta$ -электрод с присоединёнными к нему центральными проводниками линий 1 и 2, которые с целью упрощения чертежа тоже обрезаны. Основные размеры и параметры резонатора приведены в табл.1.

Все указанные в таблице размеры корпуса и коаксиальных линий – внутренние конструктивные особенности, такие как толщина стенок, материал, из которого будут изготовлены элементы резонатора, и др. в работе не рассматривались.

Заметим, что радиальная протяжённость корпуса резонатора равна 87см, это минимальное значение, достаточное для ускорения ионов до энергии 5 МэВ. Расстояние между короткозамыкающими заглушками подобрано для обеспечения необходимой частоты ускоряющего поля (заглушки располагаются симметрично относительно медианной плоскости). Подобная конструкция обеспечивает рост ускоряющего напряжения с увеличением радиуса.

**Таблица 1. Параметры резонатора**

Резонансная частота	(МГц)	54.372
Добротность		5757
<b>Корпус</b>		
Радиальная протяжённость (Rmin/Rmax)	(мм)	150/870
Высота	(мм)	370
Азимутальная протяжённость	(°)	40
<b>Δ-электрод</b>		
Радиальная протяжённость (Rmin/Rmax)	(мм)	180/770
Высота	(мм)	70
Апертура	(мм)	30
Азимутальная протяжённость	(°)	16,5
Азимутальная протяжённость ускорительного промежутка (°)		6
<b>Коаксиальные линии</b>		
Расстояние между короткозамыкающими заглушками	(мм)	1620
Радиус коаксиальных линий (внутренней/внешней)	(мм)	75/14
Расстояние от центра ускор. до оси коаксиальных линий	(мм)	260



*Рис.1. Вид резонатора*

Для интересующего нас варианта выполнения резонансной ВЧ-системы проведены трёхмерные численные расчёты электромагнитных полей. При этом, в частности, определены резонансная частота ВЧ-системы, её добротность, а также компоненты ВЧ-электрических и магнитных полей в цилиндрической системе координат. Последнее обстоятельство удобно для использования полученной карты поля в расчётах динамики ионов в циклотроне.

На рис. 2 показаны зависимости составляющих электрических полей  $E_\varphi$ ,  $E_r$ ,  $E_z$  от радиуса,  $E_\varphi$ ,  $E_r$  даны для середины ускоряющего промежутка в медианной плоскости,  $E_z$  - для  $z=0,8\text{см}$  и азимутального угла  $\varphi=31^\circ$  (отсчёт угла начинается в середине холма, угол  $\varphi=33.75^\circ$  соответствует середине первого ускорительного промежутка,  $\varphi=31^\circ$  соответствует максимуму  $E_z$ ). Значениями магнитных полей резонатора в расчётах динамики движения частиц в циклотроне пренебрегали. На рис. 3 показана зависимость ускоряющего напряжения от радиуса. Видно, что ускоряющее напряжение увеличивается от центра к периферии приблизительно в 1.3 раза. Напомним, что в предыдущих расчётах [3] использовалось аналитическое представление ускоряющего поля [4], причём предполагался рост напряжения от радиуса в 1.5 раза.

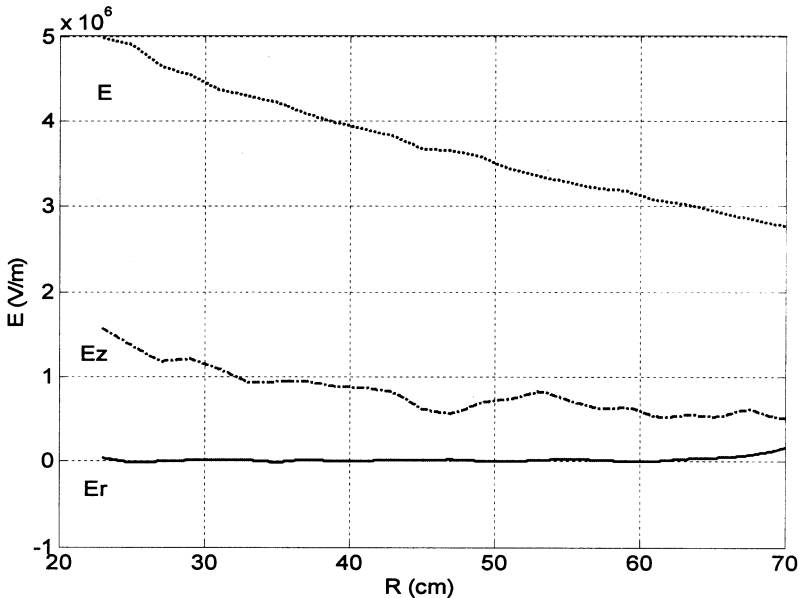
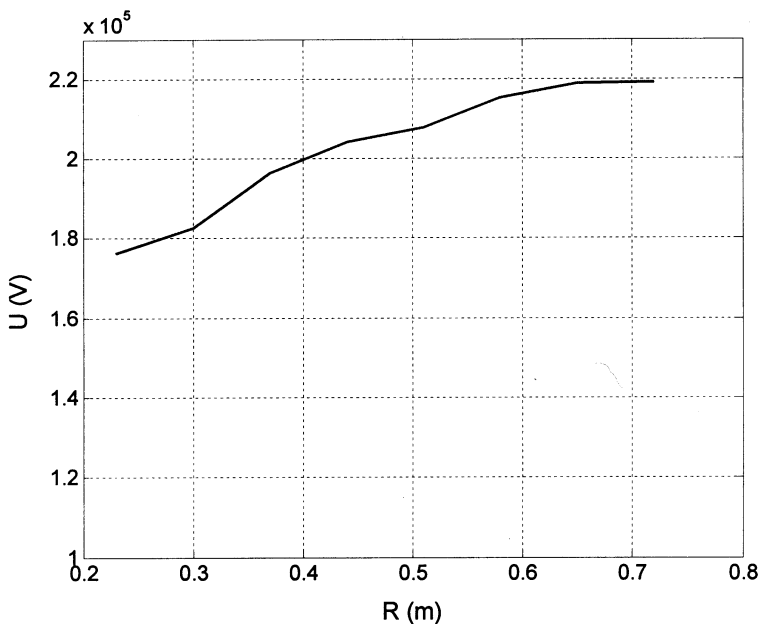


Рис.2. Зависимости составляющих электрического поля  $E_\varphi$ ,  $E_r$ ,  $E_z$  от радиуса

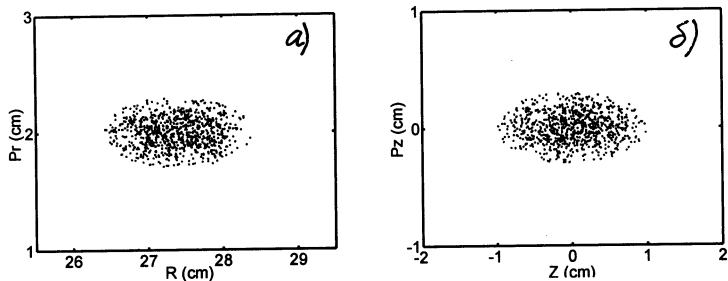


*Рис.3. Зависимость ускоряющего напряжения резонатора от радиуса циклотрона*

### **Параметры циклотрона**

В работе проводилось моделирование динамики 1000 частиц в сильноточном циклотроне с учётом пространственного заряда по методу прямого учёта кулоновского взаимодействия. В расчётах применялось нормальное распределение частиц.

Фазовая протяжённость сгустка составляла  $16^\circ$  ВЧ, начальное значение фазы центральной частицы равнялось  $35^\circ$  ВЧ. Стартовые положения пучка на фазовых плоскостях радиального и аксиального движения представлены на рис. 4 а,б соответственно.



**Рис.4. Стартовые положения пучка на фазовых плоскостях**

Основные параметры циклотрона, принимаемые в расчётах, такие же, как в [3], и представлены в табл. 2. Величина ускоряющего напряжения была подобрана таким образом, чтобы обеспечить необходимый набор энергии ионами за 6 оборотов.

Для расчётов использовалась программа KASCADS [3], написанная в математическом пакете MATLAB.

Моделирование динамики частиц проводилось в том же магнитном поле и с теми же начальными условиями, что и в работе [3], для учёта ускоряющего электрического поля применялись карты полей, полученные в вышеописанных 3-мерных численных расчётах.

**Таблица 2. Параметры циклотрона**

Тип циклотрона		секторный
Количество секторов		4
Ускоряемая частица		H <sup>+</sup> -ион
Начальная энергия	(МэВ)	0,5
Конечная энергия	(МэВ)	5
Среднее магнитное поле	(кГс)	4,3
Радиус инжекции (в холме)	(см)	27,4
Число резонаторов		2
Кратность ускорения		8
ВЧ-напряжение	(кВ)	175÷220
Средний ток пучка	(мА)	30

### **Результаты моделирования динамики частиц**

На рис. 5 показаны зависимости энергии ионов от номера оборота, на рис. 6 траектории частиц на протяжении всего цикла ускорения при токе 30 мА.

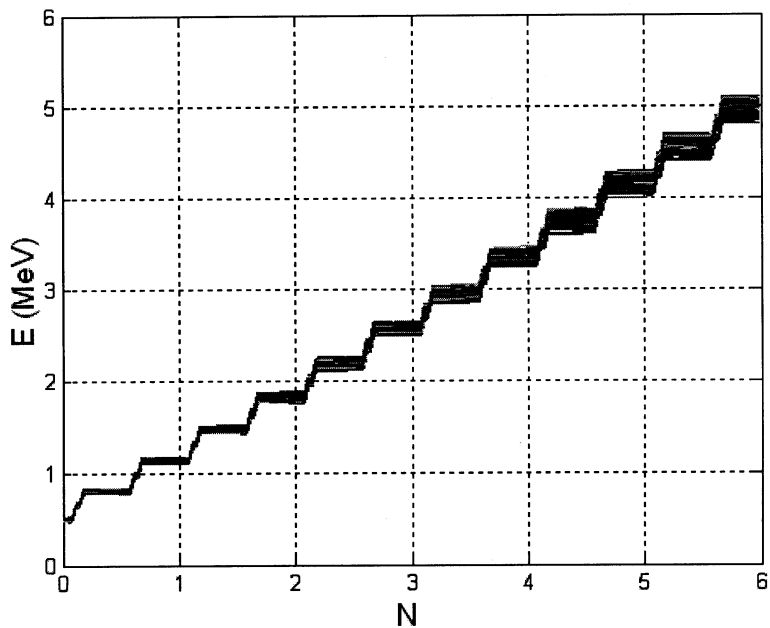


Рис.5. Зависимость энергии частиц от номера оборота ( $I=30\text{мА}$ )

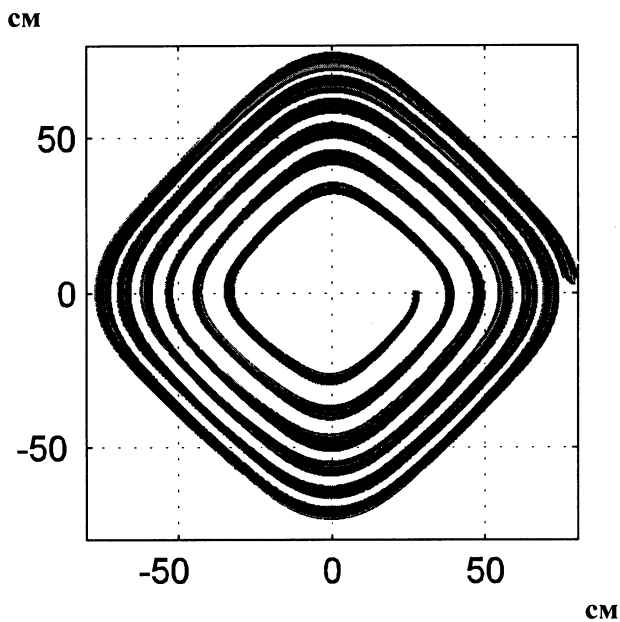
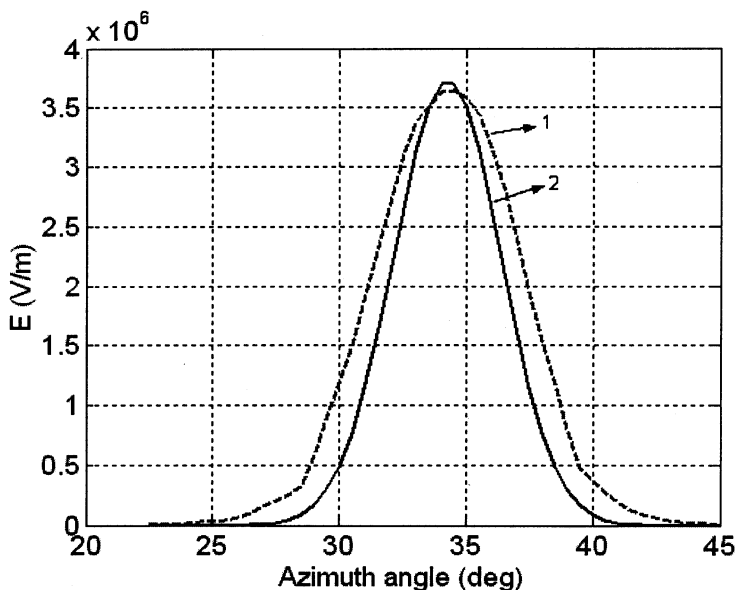


Рис.6. Орбиты частиц в ускорителе ( $I=30\text{ мА}$ )



**Рис.7.** Азимутальная составляющая ускоряющего поля в зависимости от угла для  $R=45\text{см}$  (1 - численный расчёт, 2 - аналитическое приближение)

Из рис. 6 видно, что существует разделение орбит, вполне достаточное для эффективного вывода.

На рис. 7 показаны зависимости азимутальной компоненты ускоряющего поля от азимутального угла, полученные в результате численного (кривая 1) и аналитического (кривая 2) расчётов. У зависимости (1) вершина заметно более широкая, чем в случае использования аналитического приближения (2), применяемого в предыдущих расчётах, что при прочих равных условиях приводит к меньшему энергетическому разбросу. В расчётах динамики с представлением поля (1) оказалось также, что выбор начальной фазы центральной частицы возможен в более широком, чем в предыдущих расчётах, диапазоне - разделение орбит сохраняется при  $\varphi_{in}=(35\pm 5)^\circ\text{ВЧ}$ .

### **Заключение**

Представленные результаты показывают, что для моделирования динамики частиц в циклотронах с разделёнными секторами крайне важно проведение численных расчётов электромагнитного поля ускоряющего ВЧ-резонатора, аналитическое приближение допустимо для предварительных оценок, в целом соответствует полученным численным результатам, но по некоторым параметрам имеет отличия (см. рис.7), оказывающие влияние на динамику частиц.



Резонатор, параметры и результаты расчётов которого представлены в работе, подходит для ускорения Н<sup>+</sup>-ионов в циклотроне-инжекторе, обеспечивает необходимый набор энергии с полным разбросом порядка 0.3 МэВ при токе 30 мА на выводе. Точный учёт ВЧ-полей в компьютерном моделировании динамики частиц с учётом эффектов пространственного заряда подтвердил возможность ускорения в циклотроне пучка с предельным током 30 мА, орбиты при этом полностью разделены.

Авторы благодарны А.А.Глазову за полезные обсуждения, Г.Г.Казаковой и И.В.Евсеевой за помощь в обработке результатов расчётов.

### ***Литература***

1 В.Н.Никольский, Теория электромагнитного поля, “Высшая школа”, Москва, 1961.

2 Глазов А.А. и др., Ускоряющая система. Эскизный проект. Циклотрон-инжектор (ЦИ-10), ЛЯП ОИЯИ, тема 05-2-10230-97/99, Дубна, 1998г.

3 Калининченко В.В., Карамышева Г.А., Моделирование эффектов пространственного заряда в циклотроне-инжекторе в фазотрон ОИЯИ, Сообщение ОИЯИ Р9-2002-57, Дубна, 2002.

4 Hazewindus N. et al., “The Magnetic Analogue Method as Used in the Study of a Cyclotron Central Region”, NIM,118(1974), p.125.

---

Получено 12 июля 2002 г.

Калиниченко В. В., Карамышева Г. А.

P9-2002-169

Компьютерное моделирование ускоряющего поля и динамики частиц в циклотроне-инжекторе для фазотрона ОИЯИ

Представлены результаты 3-мерных численных расчетов электромагнитных полей высокочастотного резонатора, а также динамики частиц с учетом полученного поля в сильноточном циклотроне на конечную энергию 5 МэВ, предназначенном для инъекции в фазотрон ОИЯИ. В циклотроне предполагается ускорять пучки величиной среднего тока до 30 мА, поэтому при моделировании движения ионов учитывались эффекты пространственного заряда по методу прямого учета кулоновского взаимодействия. Точный учет ВЧ-полей в компьютерном моделировании динамики частиц подтвердил возможность ускорения в циклотроне пучка с предельным током 30 мА, орбиты при этом полностью разделены.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2002

#### Перевод авторов

Kalinichenko V. V., Karamysheva G. A.

P9-2002-169

Computer Modeling of Accelerating Field and Particle Dynamics in Cyclotron-Injector for JINR Phasotron

Results of 3D electromagnetic field calculations of RF-cavity and of dynamic simulations considering these fields in 5 MeV, 30 mA separated sector cyclotron for injection into JINR Phasotron are presented. Space charge effects were taken into account using direct Coulomb particle-to-particle method.

Accurate record of the accelerating fields in computer modeling of the particle dynamics confirms that current limit for separated turns is about 30 mA for this cyclotron.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2002

**Редактор *М. И. Зарубина***  
**Макет *Н. А. Киселевой***

ЛР № 020579 от 23.06.97.

Подписано в печать 11.09.2002.

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

Усл. печ. л. 0,5. Уч.-изд. л. 0,62. Тираж 280 экз. Заказ № 53509.

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