

УДК 621.384.633

СИЛЬНОТОЧНЫЙ ЦИКЛОТРОН-ИНЖЕКТОР ДЛЯ ФАЗОТРОНА ОИЯИ

*Ю. Г. Аленицкий, А. С. Ворожцов, С. Б. Ворожцов, А. А. Глазов,
В. П. Дмитриевский, Н. Л. Заплатин, В. В. Калиниченко,
Г. А. Карамышева, С. А. Костромин, Л. М. Онищенко, Е. В. Самсонов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В качестве инжектора для фазотрона ОИЯИ рассматривается секторный изохронный циклотрон ЦИ-5 с конечной энергией H^- -ионов, равной 5 МэВ, и средним током пучка 10–30 мА. Представлены результаты трехмерного компьютерного моделирования магнитной и ускоряющей систем циклотрона, а также динамики частиц с учетом эффектов пространственного заряда. Численные расчеты, проведенные по принципиально отличным методикам, показали один результат: эффекты пространственного заряда позволят ускорить H^- -ионы с проектной интенсивностью.

Separated sector cyclotron CI-5 with extraction energy of H^- ions 5 MeV and beam intensity 10–30 mA for injection into JINR Phasotron is considered. The results of 3D electromagnetic field calculations of magnetic and accelerating systems are presented. A number of dynamic simulations taking into account space charge effects using fundamentally different methods performed by independent researchers confirm that current limit for separated turns is about 30 mA for this cyclotron.

ВВЕДЕНИЕ

Для увеличения интенсивности фазотрона ОИЯИ от 5 до 50 мкА разрабатывается проект внешней инжекции пучка в центральную область ускорителя.

Таблица 1

Тип циклотрона	Секторный
Ускоряемая частица	H^-
Энергия инжекции, МэВ	0,5
Конечная энергия, МэВ	5,0
Интенсивность, мА	10, 30
Частота обращения, МГц	6,7965
Кратность ускорения	8
Частоты свободных колебаний:	
радиальных	1,1–1,2
аксиальных	0,8–0,9

В качестве инжектора рассматривается секторный изохронный циклотрон ЦИ-5 с конечной энергией H^- -ионов, равной 5 МэВ, и средним током пучка 10–30 мА. В циклотрон ЦИ-5 H^- -ионы инжектируются после ускорения в предварительном инжекторе до энергии 500 кэВ.

Циклотрон-инжектор ЦИ-5 имеет магнитную структуру с четырьмя разделенными секторами и ускоряющую систему, состоящую из двух полуволновых резонаторов. Основные параметры ускорителя приведены в табл. 1.

1. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Для циклотрона ЦИ-5 была выбрана секторная структура магнитного поля ввиду необходимости получения большого флаттера, что важно для ускорения пучков большой

интенсивности. Кроме того, секторная структура магнита позволяет разместить ускоряющие резонаторы в промежутках между секторами и за счет этого обеспечить большой набор энергии за оборот. Параметры магнитной системы циклотрона ЦИ-5, компьютерная модель которой изображена на рис. 1, представлены в табл. 2.

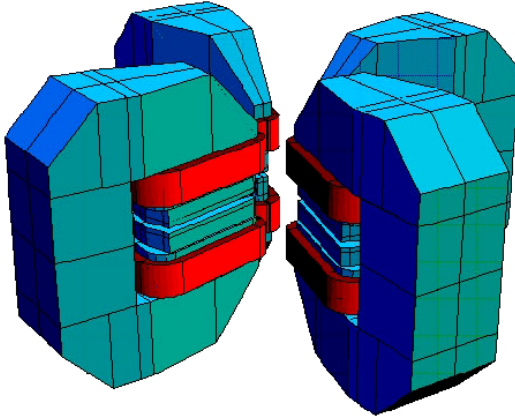


Рис. 1. Магнитная система циклотрона

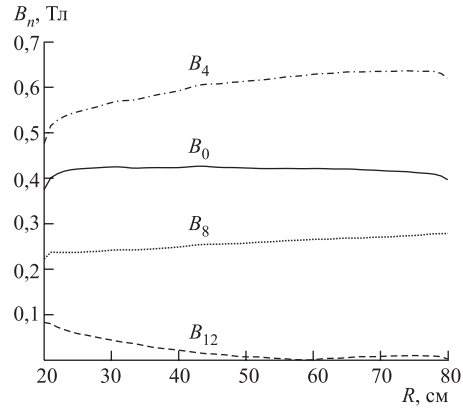


Рис. 2. Магнитное поле циклотрона ЦИ-5: B_0 — среднее магнитное поле в зависимости от радиуса; B_4 , B_8 , B_{12} — амплитуды 4-й, 8-й и 12-й гармоник магнитного поля (соответственно)

Таблица 2. Параметры магнитной системы циклотрона

Число секторов	4
Угловая протяженность сектора, °	24–38
Межполюсный зазор, см	4
Радиальная протяженность полюса, см	18–88
Среднее магнитное поле, Тл	0,43
Флаггер	0,8–0,95

Для анализа динамики пучка установки были проведены трехмерные расчеты магнитной системы циклотрона, результатом которых явилось получение карты магнитного поля. На рис. 2 приведены результаты расчетов магнитного поля.

2. УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА

Для ускорения H^- -ионов в циклотроне предполагается использовать высокочастотный полуволновой резонатор. Резонатор имеет короткозамкнутые отрезки коаксиальных линий 1 и 2, корпус 3 (см. рис. 3,а); на рис. 3,б показаны элементы, находящиеся внутри корпуса 3: «рамки» и Δ -электрод, на рис. 3,в — отдельно Δ -электрод. Основные параметры резонатора даны в табл. 3.

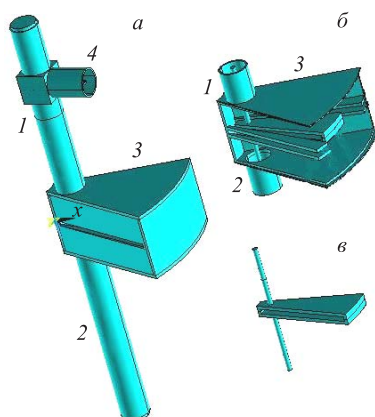


Рис. 3. Вид резонатора

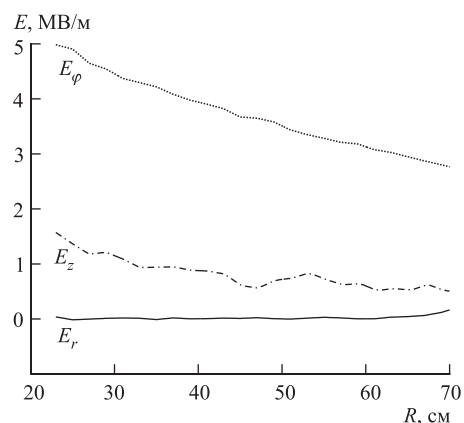
Рис. 4. Зависимости составляющих электрического поля E_φ , E_r , E_z от радиуса

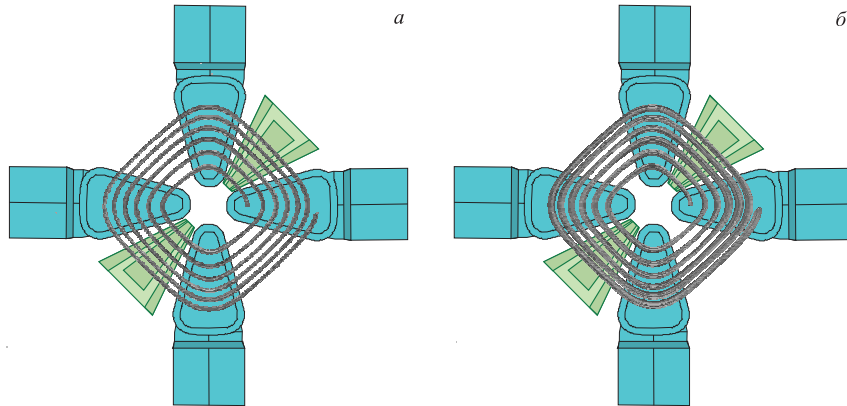
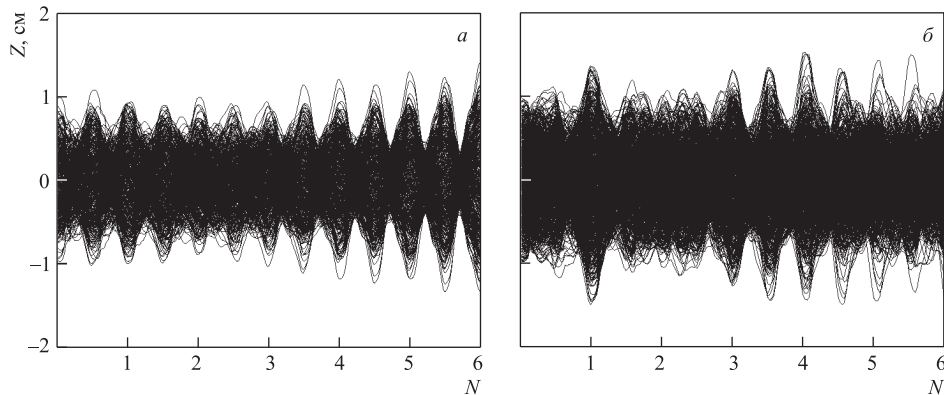
Таблица 3. Основные параметры резонатора

Резонансная частота, МГц	54,372
Расчетная добротность	5700
Число Δ -электродов	2
Угловая протяженность Δ -электродов, $^\circ$	16,5
Радиальная протяженность Δ -электродов (R_{\min}/R_{\max}), мм	180/770
Ширина ускорительной щели, $^\circ$	6
Аксиальная апертура, см	3
ВЧ-напряжение, кВ	175–220

Были проведены трехмерные численные расчеты ВЧ-резонатора, которые показали, что ускоряющее напряжение увеличивается от центра к периферии приблизительно в 1,3 раза [1]. В результате расчетов были получены карты электрического и магнитного полей резонатора. На рис. 4 показаны зависимости составляющих электрического поля E_φ , E_r , E_z от радиуса, E_φ , E_r даны для середины ускоряющего промежутка в медианной плоскости, E_z — для $z = 0,8$ см и азимутального угла, соответствующего максимуму E_z .

3. ЭФФЕКТЫ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА

Для инъекции в фазотрон ОИЯИ необходимо ускорить пучок ионов с интенсивностью 10–30 мА. При проектировании циклотрона с таким средним током пучка необходимо иметь детальную информацию о влиянии пространственного заряда на динамику частиц. В отделе новых ускорителей ЛЯП ОИЯИ проведена тщательная теоретическая проверка возможности ускорения интенсивных пучков в секторном циклотроне ЦИ-5. Для решения этой задачи были созданы программы PHASCOL [2], KASCADS [3], позволяющие исследовать эффекты пространственного заряда. Также использовались ранее написанные программы других авторов, такие как NAJO [4], PICS [5]. Численные расчеты,

Рис. 5. Орбиты частиц в ускорителе: а) $I = 0$ мА; б) $I = 30$ мАРис. 6. Аксиальное движение частиц: а) $I = 0$ мА; б) $I = 30$ мА

проведенные авторами по принципиально отличным методикам, показали возможность ускорить H^- -ионы с проектной интенсивностью [1–5].

На рис. 5, 6 представлены результаты численных расчетов динамики пучка в циклотроне-инжекторе с учетом эффектов пространственного заряда. Для расчетов использовались карты электрического и магнитного полей, полученные в результате численных трехмерных расчетов магнитной и ускоряющей систем циклотрона. Моделирование динамики частиц проводилось для банча с фазовой протяженностью 16° ВЧ, частицы равномерно распределялись внутри фазовых эллипсов (аксиальный и радиальный эмиттансы на инъекции составляли $50 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$). Количество макрочастиц в расчетах не превышало 10 000.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Компьютерное моделирование динамики частиц показало, что необходимый набор энергии происходит за шесть оборотов, разделение орбит сохраняется на протяжении

всего цикла ускорения при интенсивности тока вплоть до 30 мА, амплитуда аксиальных колебаний при этом не превышает 1,5 см. Энергетический разброс на выводе составляет $\pm 0,05$ МэВ, или $\pm 1\%$, при среднем токе пучка 0 мА и $\pm 0,15$ МэВ, или $\pm 3\%$, при токе 30 мА.

Кроме прикладной цели — увеличения интенсивности фазотрона ОИЯИ — создание циклотрона-инжектора позволит, продемонстрировав ускорение сильноточных пучков в циклическом ускорителе, приступить к разработке ускорительных комплексов, предназначенных для использования в энергетике, для трансмутации отработанного ядерного топлива и радиоактивных отходов и других практических применений, требующих пучков большой мощности.

Авторы благодарны Д. В. Виноградовой и О. Е. Лисенковой за оформление рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Калиниченко В. В., Карамышева Г. А.* Компьютерное моделирование ускоряющего поля и динамики частиц в циклотроне-инжекторе для фазотрона ОИЯИ. Препринт ОИЯИ Р9-2002-169. Дубна, 2002. 8 с.
2. *Онищенко Л. М. и др.* Численное моделирование эффектов пространственного заряда в секторном циклотроне // *Материалы междунар. семинара по динамике и оптимизации пучков*, Санкт-Петербург, Россия, 2002.
3. *Калиниченко В. В., Карамышева Г. А.* Моделирование эффектов пространственного заряда в циклотроне-инжекторе в фазотрон ОИЯИ. Сообщение ОИЯИ Р9-2002-57. Дубна, 2002. 10 с.
4. *Karamysheva G. A., Onischenko L. M., Vorozhtsov S. B.* Space charge effects in a high-current Injector Cyclotron // *EPAC 2000, Vienna, 2000*. P. 548; *Part. Nucl., Lett.* 2001. No. 2[105]. P. 56–60.
5. *Ворожцов А. С. и др.* Эффекты продольного пространственного заряда пучка в циклотроне-инжекторе для фазотрона ОИЯИ. Сообщение ОИЯИ Р9-2001-195. Дубна, 2001.