

Эффекты пространственного заряда в циклотронах

С.Б. Ворожцов, А.А. Глазов, Г.А. Карамышева, Л.М. Онищенко

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Введение

Развитие современных циклотронов идёт в направлении повышения интенсивности, энергии и расширения ассортимента ускоряемых частиц. В настоящее время наблюдается растущий интерес к использованию сильноточных пучков ускоренных частиц. Циклотрон, как более простой, дешёвый и экономичный ускоритель по сравнению с линейным, наилучшим образом подходит для генерации пучков высокой интенсивности. Основные проблемы, возникающие при разработке циклотронов и линейных ускорителей на большие токи, связаны с эффектами пространственного заряда пучка, которые возникают из-за кулоновского расталкивания, усиливающегося при увеличении плотности заряда. Известно, что в компактных циклотронах предельный по поперечному заряду ток не превышает 10 мА. Возможность применения аксиальной инжекции и использования внешних источников, значительно более высокие частоты аксиальных бетатронных колебаний уменьшают ограничения по поперечному заряду в секторных циклотронах. Интенсивный набор энергий в подобных установках позволяет избежать потерь на выводе, обусловленных действием продольных сил пространственного заряда.

В данной работе изучалось влияние пространственного заряда на движение частиц в секторных циклотронах, предназначенных для ускорения дейтронов, протонов и H^- -ионов. Численные расчёты проводились с использованием программного комплекса, описанного в работе [1], использующего для учёта сил пространственного заряда *equivalent continuous method*.

1. Динамика частиц в сильноточном циклотроне

Проводились расчёты по ускорению дейтронов и протонов с интенсивностями до 20 и 30 мА соответственно, до энергии 15 МэВ в секторном циклотроне. Параметры, используемые для расчётов, представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Тип циклотрона - секторный		
Ускоряемая частица		дейтрон протон
Энергия инжекции (МэВ)		0.5 0.5
Конечная энергия (МэВ)		15 15
Интенсивность (мА)		10 10, 30
Магнитная система		
Число секторов		4 4
Угловая протяжённость сектора (°)		30 30
Межполюсной зазор (см)		3 3
Радиальная протяжённость полюса (см)		15÷165 15÷110
Среднее магнитное поле (кГс)		5 5
Максимальный флаттер		1.45 1.45
Ускоряющая система		
Число Δ -электродов		2 2
Угловая протяжённость Δ -электродов (°)		12.5 26
Ширина уск. щели (°)		2.5 4
Аксиальная апертура (см)		2 2
ВЧ-напряжение (кВ)		100÷350 200÷350
Набор энергии (МэВ)		0.4÷1.2 0.8÷1.3
Резонансная частота (МГц)		49.5 49.5
Частота обращения (МГц)		4.125 8.25
Кратность ускорения		12 6

Поперечные эмиттансы пучка при инжекции принимались равными $50 \pi^* \text{мм}^* \text{мрад}$ (для дейтронов) и $30 \pi^* \text{мм}^* \text{мрад}$ (для протонов), продольный – $75 \pi^* \text{мм}^* \text{мрад}$.

1.1. Центр

На рис. 1, 2 представлены зависимости аксиальных эмиттансов от энергии дейтронов и протонов соответственно. Из рисунков видно, что действие поперечных сил пространственного заряда приводит к резкому увеличению эффективных аксиальных эмиттансов (объединение эмиттансов для всех энергий в пучке) в центре ускорителя. Таким образом, для дейтронов допускается ток не более 20 мА (аксиальный разброс при этом не превышает апертуры ускорителя), для протонов – 30 мА (аксиальный размер пучка < 0.8 апертуры Δ -электрода). Однако следует заметить, что в расчётах эмиттанс вычислялся как функция среднеквадратичного отклонения, т.е. не все частицы попадают в эмиттанс, следовательно, реальный предел по поперечному пространственному заряду находится несколько ниже.

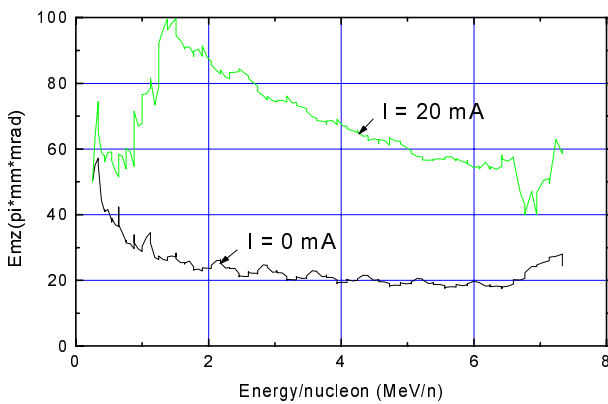


Рис. 1. Зависимость эффективных аксиальных эмиттансов от энергии дейтронов для $I = 0 \text{ мА}$ и $I = 20 \text{ мА}$.

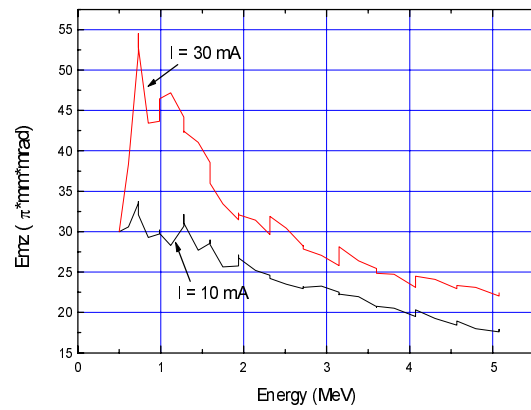


Рис. 2. Зависимость эффективных аксиальных эмиттансов от энергии протонов для $I = 10 \text{ мА}$, $I = 30 \text{ мА}$.

1.2. Зона вывода

Для минимизации действия продольного пространственного заряда необходим большой набор энергии, при этом нужно обеспечить сохранение надлежащего качества пучка в процессе ускорения. В наших расчётах набор энергий позволил ускорить пучок частиц до энергии 15 МэВ за 20 оборотов (дейтроны) и 14 оборотов (протоны). При этом напряжение на резонаторах менялось линейно (величины указаны в таблице). На рис. 3 представлены радиальные распределения дейтронов при $I = 0 \text{ мА}$ (слева), при $I = 10 \text{ мА}$ (справа), на рис. 4 – протонов при $I = 10 \text{ мА}$ (слева), при $I = 30 \text{ мА}$ (справа). Видно, что ситуация с ускорением протонов существенно лучше, несмотря на то, что при ускорении дейтронов использовался flattop-резонатор, а при ускорении протонов – нет.

Заметим, что начальная фазовая ширина сгустка 20 град ВЧ является оптимальной для тока 30 мА; для тока 10 мА оптимальная ширина сгустка равна приблизительно 10 град ВЧ. Уменьшение фазовой ширины приводит к увеличению плотности заряда в банке, что приводит к ухудшению качества пучка; увеличение фазовой ширины ухудшает условия для формирования круглого пучка, что приводит к формированию пучка с ярко выраженной спиральной формой (см. рис. 5 слева). При оптимальной для каждого тока величине фазовой протяжённости сгустка быстро формируется круглый пучок (см. рис. 5 справа, процесс формирования почти завершён), как описано в работе С. Адама [2].

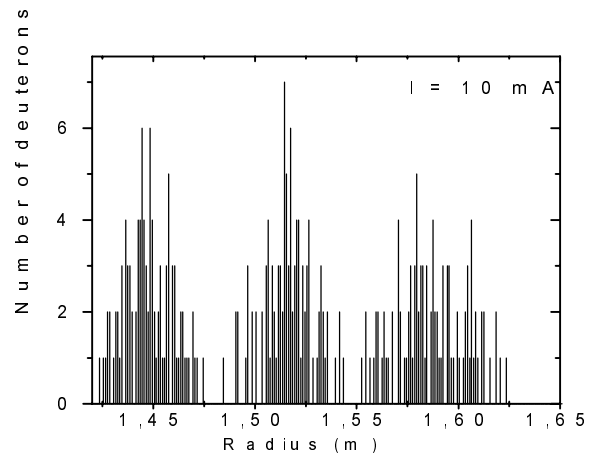
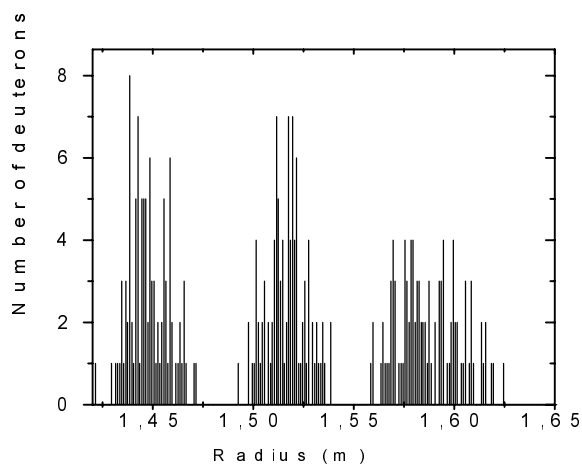


Рис. 3. Радиальные распределения дейтронов для последних трёх оборотов (слева – при $I = 0$ мА, справа – при $I = 10$ мА).

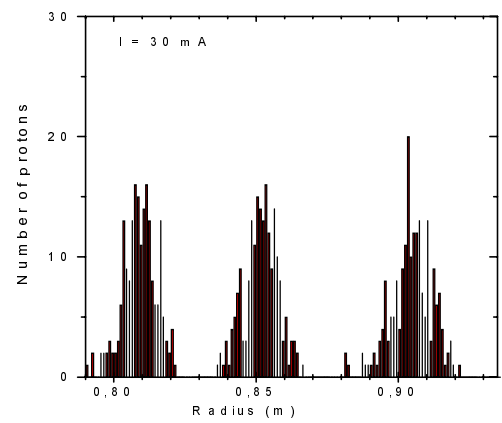
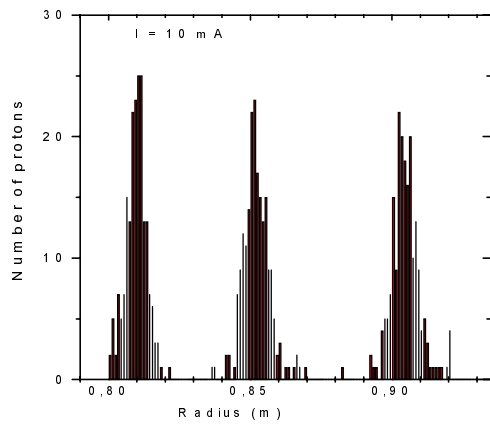


Рис. 4. Радиальные распределения протонов для последних трёх оборотов (слева – при $I = 10$ мА, справа – при $I = 30$ мА).

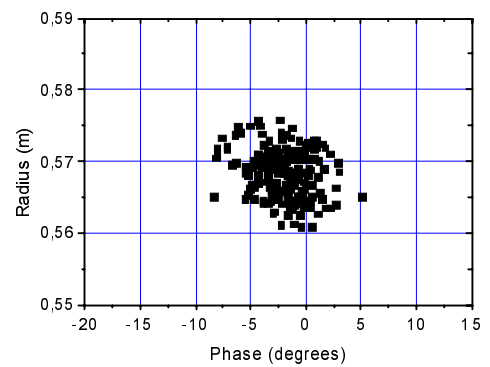
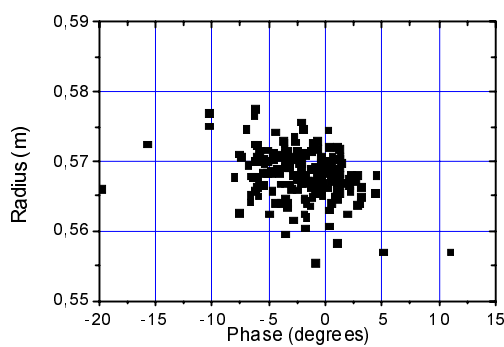


Рис. 5. Портреты пучка после 7 оборотов, $I = 10$ мА, фазовая ширина сгустка при инжекции 20 град ВЧ (слева) и 10 град ВЧ (справа).

2. Инжектор в Фазотрон ОИЯИ

Для преодоления ограничения на предельную интенсивность в центральной зоне Фазотрона ОИЯИ, обусловленного в основном слабостью вертикальной фокусировки, был предложен способ увеличения, примерно на порядок интенсивности протонного пучка ускорителя путем внешней инжекции и последовательной двухступенчатой перезарядки пучка H^- сначала в H^0 и затем в H^+ [3].

В качестве инжектора в Фазотрон предлагается использовать секторный циклотрон типа описанного выше, но с конечной энергией 5 МэВ, радиус магнита при этом составит ~ 0.7 м. Учитывая отсутствие необходимости использования flattop – резонатора, расчёты проводились с наличием четырёх Δ -электродов, что позволило снизить ускоряющее напряжение до $100\div 200$ кВ.

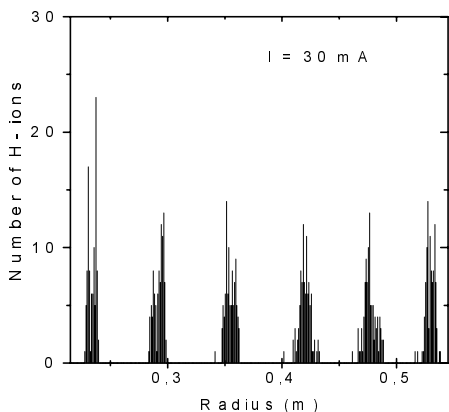


Рис. 6. Радиальные распределения протонов.

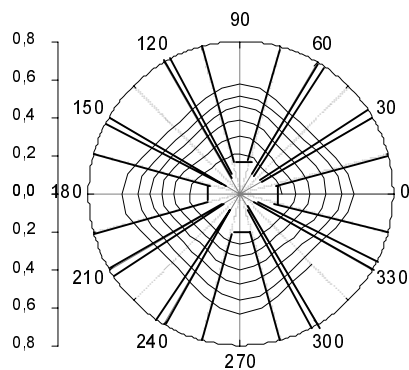


Рис. 7. Траектория равновесной частицы.

На рис.6 представлены радиальные распределения протонов при токе $I = 30$ мА. Расстояние между оборотами в зоне вывода около 5 см, при этом наблюдается некоторое уширение пучка, приводящее к уменьшению зоны, свободной от частиц, до 3 см. На рис. 7 показана траектория равновесной частицы.

Заключение

Силы пространственного заряда допускают работу дейтронного варианта сильноточного циклотрона в режиме разделённых орбит с предельным током пучка до 10 мА. Использование flattop-резонатора обязательно.

Эффекты поперечного пространственного заряда приводят к существенному увеличению аксиального эмиттанса в центре протонного варианта циклотрона при $I = 30$ мА, не превышая при этом аксептанса ускорителя. При заданном наборе энергии частиц имеет место достаточное для 100% вывода пучка протонов разделение орбит на конечном радиусе при интенсивностях ниже 30 мА без использования flattop-резонатора. Рабочей интенсивностью можно считать интенсивность в 10 мА.

Силы пространственного заряда допускают работу циклотрона-инжектора в режиме разделённых орбит с предельным током пучка до 30 мА. Использование четырёх Δ -резонаторов позволит существенно уменьшить ускоряющие напряжения. Рабочей интенсивностью можно считать интенсивность в 10 мА.

Авторы глубоко признательны Е.М. Сыресину за поддержку при проведении работы.

Литература

1. Karamysheva G.A., Onischenko L.M., Vorozhtsov S.B. Space Charge Effects in a High-Current Injector Cyclotron, In Proc. EPAC 2000, Vienna, 2000.
2. S. Adam, Space charge effects in cyclotrons – from simulations to insights, in Proc. Cyclotrons and their Applications, Caen, 1998, p.446.
3. О.В.Савченко “Предложения по новому варианту внешней инжекции фазотрона ОИЯИ и возможностям его реализации”. Дубна, 26 ноября 1999.

