

P9-2001-195

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

**ЭФФЕКТЫ ПРОДОЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО
ЗАРЯДА ПУЧКА В ЦИКЛОТРОНЕ-ИНЖЕКТОРЕ
ДЛЯ ФАЗОТРОНА ОИЯИ**

Введение

Для преодоления ограничений на предельную интенсивность в центральной зоне фазотрона ОИЯИ был предложен способ увеличения интенсивности протонного пучка до ~ 50 мкА путем внешней инжекции и последовательной двухступенчатой перезарядки пучка H^- сначала в H^0 , а затем в H^+ , [1] ÷ [2].

В качестве одного из вариантов инжектора рассматривается сильноточный циклотрон на энергию $H^- \sim 5$ МэВ, интенсивностью выведенного пучка $10 \text{ мА} \div 50 \text{ мА}$ и соответствующего радиального качества ($20\mu\text{ м} \cdot \text{мрад}$), [3]. Требования к характеристикам инжектируемого пучка могут быть уточнены по мере проработки процесса захвата частиц в фазотронный режим ускорения.

Повышенная требуемая интенсивность пучка циклотрона предполагает проведение отдельного исследования динамики частиц с учетом их собственных полей.

Проблемы продольного заряда пучка в циклотроне

Ниже приводится краткое описание проблемы на основе обзора [4]. Рассматривается самосогласованная задача расчета собственного поля, создаваемого частицами в двигающемся пучке, и распределения частиц в пучке. Результирующие силы в значительной степени являются нелинейными. Исследование проблемы обычно проводится при помощи простых моделей, а также путем численного моделирования. Для изучения области больших отклонений частиц от центра пучка (“хвосты” распределения) выполняются расчеты по необходимости при достаточно большом числе пробных частиц, представляющих пучок.

Эффектам продольного пространственного заряда должно быть уделено особое внимание в силу отсутствия продольной фокусировки в изохронных циклотронах. В линейном приближении рассматриваемые эффекты приводят к дополнительному разбросу энергии частиц в пучке. Эта часть увеличения радиального размера пучка может быть скомпенсирована соответствующей регулировкой фазы ВЧ-напряжения, а также установкой “flattop” системы в циклотрон.

Нелинейные эффекты вследствие взаимной зависимости кулоновских сил и распределения заряда в пучке, а также искривления формы банча приводят к ухудшению качества пучка и увеличению потерь частиц за счет протяженных “хвостов” в распределении частиц и образования так называемого “гало” пучка.

Соседние орбиты остаются разделенными до тех пор, пока разброс по энергии в результате сил пространственного заряда, а также распределения частиц по фазам ВЧ меньше, чем набор энергии за оборот в зоне вывода частиц из камеры ускорителя. Для того чтобы учесть влияние соседних орбит, предложена секторная модель, которая базируется на предположении полностью перекрывающихся орбит, образующих вращающийся секторный пучок. Согласно этой модели максимальная интенсивность пучка обратно пропорциональна общему числу оборотов в 3-й степени.

Совместное действие сил пространственного заряда и эффектов связи радиального и продольного движения деформирует пучок к характерной форме круга в координатах радиус-азимут.

Продольное согласование в плоскости, определяемой радиусом и фазой ВЧ, становится столь же важным, как и хорошо известное согласование в поперечном направлении. Это обстоятельство допускает функционирование циклотрона за пределами достижимой интенсивности пучка, определяемой силами пространственного заряда частиц.

Компьютерные программы

Программа NAJO

Предварительный анализ динамики частиц в установке с учетом эффектов пространственного заряда был выполнен в работе [5] в рамках ранней модели (программа NAJO, [6]). Однако эта модель имеет определенные ограничения, не позволяющие целиком полагаться на получаемые с ее помощью результаты. В частности, можно отметить следующие моменты:

1. Для оценки эффекта пространственного заряда в программе NAJO применяется метод эквивалентного непрерывного распределения, в котором учитывается лишь среднеквадратичное распределение пучка, а детали распределения заряда в банке остаются вне рамок рассмотрения [7].
2. Эллипсоид, которым в программе NAJO заменяется реальный пучок, всегда ориентирован вдоль $r - \phi - z$ - осей и отцентрован относительно центральной частицы. Таким образом, программа не учитывает связь $r - \phi$ - движения частиц.
3. В программе также не учитывается вклад поля отражения заряда пучка от проводящих поверхностей, ограничивающих аксиальную апертуру установки.
4. Влияние соседних оборотов также не принимается во внимание. Как следствие этого имеет место недооценка эффекта пространственного заряда в процессе расчета.
5. Кроме того, существует ограничение на количество ускоряемых частиц, представляющих пучок (~ 100 в настоящий момент).

Сферическая модель - программа PICS

Для устранения, по крайней мере, части вышеприведенных модельных ограничений в данной работе была использована программа PICS [8], позволяющая более реалистично моделировать рассматриваемые эффекты. В этой программе имеется возможность детального учета распределения заряда в банке, влияния соседних орбит, а также эффекта отражения в проводящих стенках. Число ускоряемых частиц может достигать 5000 и более. Подробное описание этой компьютерной модели и ее возможностей приведено в работе [9]. Здесь мы приводим очень сокращенную ее характеристику.

В этой программе на основе сферической двумерной жидкостной модели используется принцип частица в ячейке, независимый от ограничений,

связанных с разбросом по энергии и формой банча. Подразделение движения частиц на три различных временных масштаба - это ключ к упрощению вычислений. Очень быстрая часть - общее движение всех частиц вместе с центром тяжести банча. Расчета этого движения можно избежать при помощи выбора системы координат, двигающейся вместе с банчем. Дальнейшее разделение имеет место между быстрым движением за счет бетатронных колебаний и медленным движением, вызванным силами, связанными с эффектом пространственного заряда. Радиальные бетатронные колебания позволяют частицам двигаться около круговой орбиты в плоскости, определяемой радиусом и азимутом циклотрона. Объединяя это движение с вертикальными бетатронными колебаниями, быстрое движение частиц может быть представлено как движение на поверхности вертикального цилиндра. Для вычисления медленного движения, связанного с эффектом пространственного заряда, необходимо усреднение значения электрического поля на поверхности цилиндра. Далее, в сферической модели предполагается, что результаты усреднения одинаковы для всех цилиндров с одним центром независимо от их различий по высоте и радиусу. Затем эти цилиндры формируются в группы так, что они могут двигаться совместно. Считая, что лишь несколько частиц одновременно имеют большие амплитуды радиальных и вертикальных бетатронных колебаний, представляем каждую группу цилиндров в виде заряженной сферы с зарядом, сосредоточенным в ее центре.

При тщательном анализе радиальный пространственный заряд должен быть разделен на некогерентную часть, действующую как поперечная сила пространственного заряда, и на когерентную часть, в которую включена продольная сила пространственного заряда. Используя такое разделение движения в различных временных масштабах и принцип усреднения, в сферической модели устанавливается эквивалентность между силой продольного и когерентного радиального пространственного заряда. Движение точек в медианной плоскости представлено центрами заряженных сфер, которые могут быть перекрываться с другой сферой. Таким образом, моделируется поведение 3-мерного распределения заряда, связанного с продольной и с когерентной радиальной силой пространственного заряда в циклотроне. Закон, описывающий силу взаимодействия между двумя заряженными сферами, может быть рассчитан аналитически. В этом расчете тот факт, что сферическая модель описывает движение в изохронном циклотроне, учитывается тем, что движение всегда имеет место в направлении, перпендикулярном направлению силы. Из-за большого объема расчетов распределения силы по радиусу и фазе требуется 2-мерное преобразование распределения плотности заряда как функции силы между двумя сферами. Современная численная математика позволяет выполнять такую свертку, используя метод быстрых преобразований Фурье до и после произведения Хадамарда. В методе крупных частиц информация преобразовывается в прямом и обратном направлении между координатами движущихся частиц и регулярной сеткой, используемой для расчета функций силы. Каждой частице может быть задано собственное значение плотности пространственного заряда сферы ее представляющей.

Исходные данные для расчета

Для характеристики установки использовалась выборка из набора параметров циклотрона, описанных в работах [10] и [5].

В связи с трудностями реализации системы инжекции было принято решение снизить уровень магнитного поля циклотрона и использовать ускорение на 8-й гармонике ВЧ. Соответствующие новые значения параметров для этого варианта приведены в таблице. Все дальнейшие вычисления относятся именно к этому новому набору параметров.

Параметры

Параметр	Значение	Единицы измерения
Ускоряемая частица	H-	
Энергия инжекции	0,5	МэВ
Конечная энергия	5,0	МэВ
Интенсивность	10 ÷ 50	мА
Инжекция		
Средний радиус инжекции	22,5	см
Амплитуды свободных колебаний A_r / A_z	3 FWHM	мм
Фазовая ширина сгустка	20 FWHM	град. ВЧ
Энергетический разброс в пучке	1	промилле
Частоты бетатронных колебаний Q_r / Q_z	0,995 / 1,01	
Ускорение		
Частота обращения	6,7965	МГц
Кратность ускорения	8	
Число оборотов	7,5	
Вывод		
Средний радиус конечной орбиты	69,5	см
Шаг орбит	~55	мм
Частоты бетатронных колебаний Q_r / Q_z	1,012 / 0,919	
Ускоряющая система		
Число Δ -электродов	2	
Резонансная частота	54,372	МГц
Эффективная угловая протяжённость Δ -электродов	22,5	град.
Аксиальная апертура	20	мм
ВЧ-напряжение на Δ -электроде	120 ÷ 180	кВ
Максимальный набор энергии за оборот	0,5 ÷ 0,7	МэВ
Магнитная система		
Число секторов	4	
Угловая протяжённость сектора	24	град.
Межполюсный зазор	30	мм
Радиальная протяжённость полюса	18,8 ÷ 83,9	см
Среднее магнитное поле	0,414 ÷ 0,412	Тл
Флаттер	1,1 ÷ 1,9	
Количество ампервитков	37,4	кА×В

Схематическое расположение основных структурных элементов ускорителя показано на Рис. 1. Исходные данные для проведения расчетов в рамках данной компьютерной модели приводятся в последующих разделах.

Ускоряющая система

Набор энергии за оборот линейно изменялся по радиусу в пределах, указанных в таблице. Минимальное значение напряжения на Δ -электроде 120 кВ соответствует допустимой мощности ВЧ-системы. Максимальное же значение напряжения задано равным 180 кВ исходя из практической реализуемости роста напряжения к концу процесса ускорения на $\sim 50\%$ по отношению к напряжению в области инжекции пучка.

Значение аксиальной апертуры 20 мм учитывалось при вычислении экранирования кулоновского взаимодействия частиц проводящими поверхностями, расположенными выше и ниже орбиты.

Магнитная система

Основными параметрами, описывающими циклотрон, являются ВЧ-частота, номер гармоники и тип ускоряемой частицы. На основе этих параметров вычисляется требуемая зависимость среднего магнитного поля от радиуса. Распределение магнитного поля для пространственной структуры магнита циклотрона было получено в работах [11], [10]. Динамические характеристики магнитного поля, определяемые на замкнутых орбитах (Рис. 5, 6) в выбранной карте поля с учетом ее изохронизации, показаны на Рис. 2÷4.

Исходное распределение частиц в пучке

Распределение заряда в зависимости от фазы ВЧ задавалось следующей формулой:

$$I(\varphi) = \left[1 - \left(\frac{\varphi}{\varphi_{\text{lim}}} \right)^2 \right]^{xm} .$$

Максимальная фазовая протяженность банча φ_{lim} вычисляется исходя из эффективной фазовой ширины пучка $\varphi_{\text{eff}}=32^\circ$ ($\Delta\varphi=20^\circ\text{FWHM}$), умноженной на коэффициент расширения размера пучка, который зависит от выбираемого распределения азимутальной плотности частиц:

$$\varphi_{\text{lim}} = \left(\sqrt{\frac{xm+1}{2}} \right) \times \left(\frac{\varphi_{\text{eff}} - \varphi_{\text{hins}}}{2} \right) + \frac{\varphi_{\text{hins}}}{2} ,$$

где φ_{hins} - ширина плато в центральной зоне распределения. Во всех расчетах в данной работе принималось $\varphi_{\text{hins}}=0^\circ$. и $xm=7,5$. Соответствующее распределение частиц по фазам ВЧ изображено на Рис. 7.

Эффективный радиус пучка $R_{\text{beam}}=4,8\text{мм}$ (амплитуда радиальных колебаний=3 мм FWHM). Для получения полной радиальной ширины пучка к этой величине прибавлялась добавка $\Delta Y = 0,2$ мм, связанная с разбросом энергии $\Delta E_{\text{kinetic}} / E_{\text{kinetic}} = 0,001$ в банче. Пучок был представлен 4623 квазичастицами. Получаемое таким образом начальное распределение заряда в пучке приведено на Рис. 8. На этом рисунке по осям отложены линейные отклонения частиц от центра пучка в мм (ось абсцисс направлена вдоль азимута, ось ординат – вдоль радиуса). На верхней части рисунка сплошными линиями показаны уровни в распределении заряда для 2, 5, 10, 20, 50, 80 и 90% от максимального значения. В нижней части рисунка отмечено двойное среднеквадратичное отклонение частиц вдоль азимута, $2 \times l=9,08$ мм и вдоль радиуса, $2 \times d=4,31$ мм. Аналогичные обозначения применимы ко всем последующим соответствующим графикам.

Результаты расчетов

В процессе ускорения имеет место преобразование начального распределения заряда пучка, зависящее от интенсивности пучка, как это показано на Рис.9 и 10.

Увеличение продольного размера пучка для нулевой интенсивности связано с ростом среднего радиуса орбиты. Изгиб пучка определяется энергетическим разбросом в пучке, возникающим в процессе ускорения различных частиц, располагаемых при различных фазах ВЧ.

Для интенсивности 30 мА эффект пространственного заряда проявляет себя в полной мере в формировании круглого пучка и образовании гало вокруг него. В соответствии с теоретическими предсказаниями [9], подтвержденными экспериментально [12], уже ко 2-му обороту за счет значительных сил пространственного заряда частиц образуется отчетливый круглый пучок, форма и размеры которого сохраняются до конца ускорения (Рис.11).

Эволюция линейных размеров пучка в процессе ускорения показана на Рис.12 и 13. Будем полагать, что до ~98% частиц соседних оборотов находятся вне области перекрытия радиальных распределений этих оборотов. Т.е. степень перекрытия соседних оборотов находится на уровне ~ 2%. Для обеспечения такого условия потребуем, чтобы эффективный радиальный размер пучка $d = 2 \times 2,88 \times \sigma$, где σ - среднеквадратичное радиальное отклонение частиц от центра пучка, был бы меньше, чем радиальное расстояние между соседними орбитами в зоне вывода пучка. Из Рис. 13 видно, что значение “d” существенно меньше разделения между орбитами для всех указанных интенсивностей ускоряемых частиц.

Зависимости эффективного радиального размера пучка на конечном радиусе от интенсивности, фазового размера и радиального качества исходного (инжектируемого) пучка показаны на Рис. 14, 15 и 17. На этих же графиках отмечены пунктирной линией результаты расчетов для параметров из таблицы. Видно, что наблюдается некоторый оптимум (минимум по эффективному

радиальному размеру пучка) для упомянутых параметров. Наличие такого оптимума можно определить как обобщенное согласование пучка с учетом сил продольного пространственного заряда. Происходящие изменения радиального размера пучка в зависимости от указанных параметров объясняются соответствующим изменением плотности заряда в банче, что приводит к различным явлениям, в частности формированию так называемого “гало” пучка (см. Рис.16).

Поперечное движение частиц

Очевидно, что справедливость полученных результатов в рамках двумерной модели, реализованной в программе PICS, имеет место в том случае, если достаточно хорошо выполняются допущения, принятые в этой модели. В частности, гипотеза шаровой модели макрочастиц предполагает одинаковость характерных амплитуд свободных радиальных и аксиальных колебаний, Таким образом, имеется в виду устойчивость аксиальных колебаний даже при наличии сил поперечного пространственного заряда.

Хотя эффекты поперечного пространственного заряда требуют отдельного рассмотрения вне рамок данной компьютерной модели, однако некоторая расчетная информация для данной установки уже была получена в предыдущих работах. В частности, в работе [5] была продемонстрирована устойчивость аксиальных колебаний для предполагаемого уровня интенсивности пучка установки. При этом использовалась 3-мерная программа NAJO, применимость которой для данного ускорителя достаточно хорошо может быть обоснована. Например, если иметь в виду эффект формирования круглого пучка, продемонстрированный в настоящей работе, гипотеза заряженного эллипсоида в программе NAJO выглядит достаточно убедительно. Этой же цели – устойчивости аксиального движения при наличии поперечного пространственного заряда – служит формирование такого магнитного поля, для которого частота аксиальных колебаний находится на уровне $Q_z \sim 1,4$ (см. Рис. 2).

В соответствии с вышесказанным, применимость выбранной модели для исследуемых эффектов можно считать достаточно обоснованной.

Заключение

Таким образом, для приведенного диапазона токов пучка и параметров циклотрона не наблюдается ограничение по предельной интенсивности со стороны продольного пространственного заряда частиц.

Авторы выражают глубокую признательность доктору С. Адаму за предоставленную возможность использовать программу PICS для расчетов, И.Н. Кияну за подготовку программы CAMP для расчета изохронного поля и Е.М. Сыресину за инициализацию работы, обсуждение результатов и постоянную поддержку.

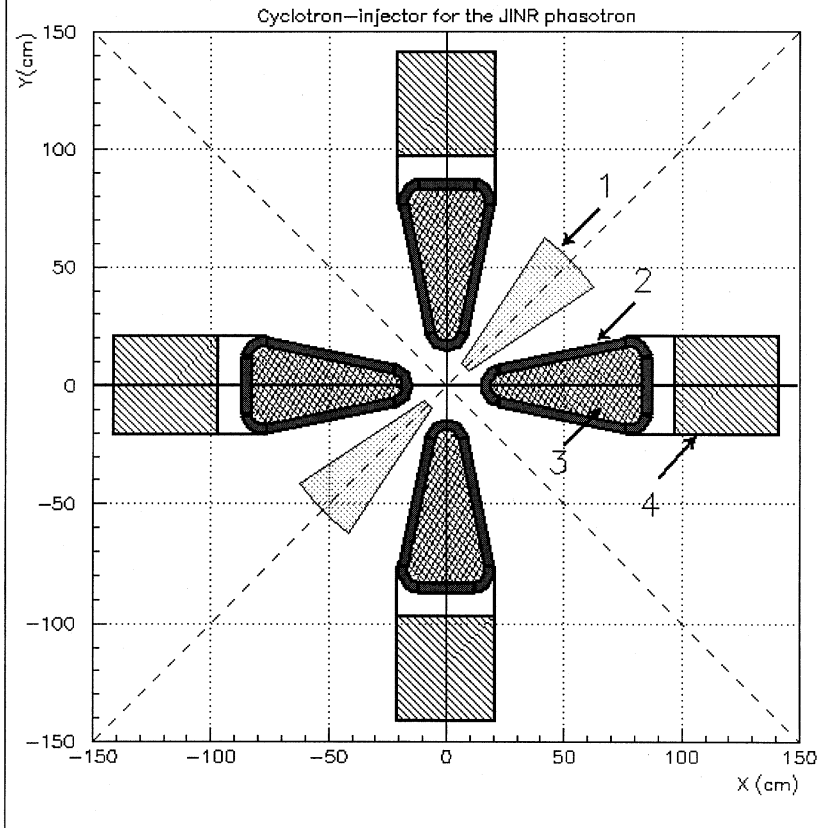


Рис. 1. Схема установки 1— Δ -электрод (угловой размер соответствует средним линиям в ускоряющих промежутках); 2—обмотка; 3—полюс магнита; 4—вертикальное ярмо магнита

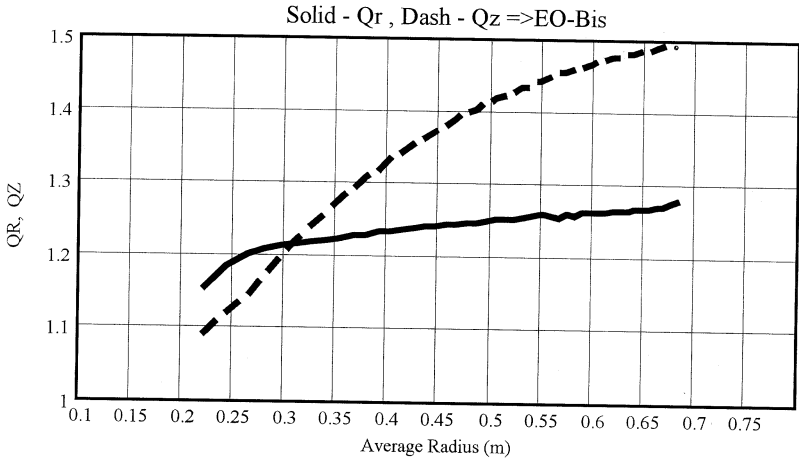


Рис. 2. Частоты свободных колебаний. Сплошная линия – Qr, пунктирная – Qz

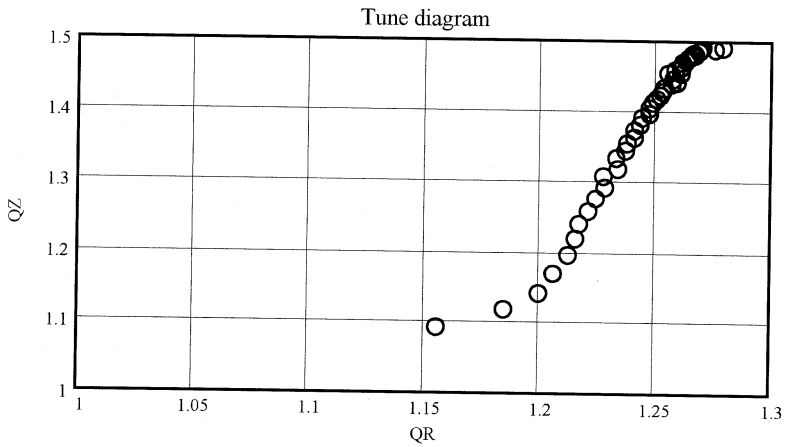


Рис. 3. Диаграмма частот свободных колебаний

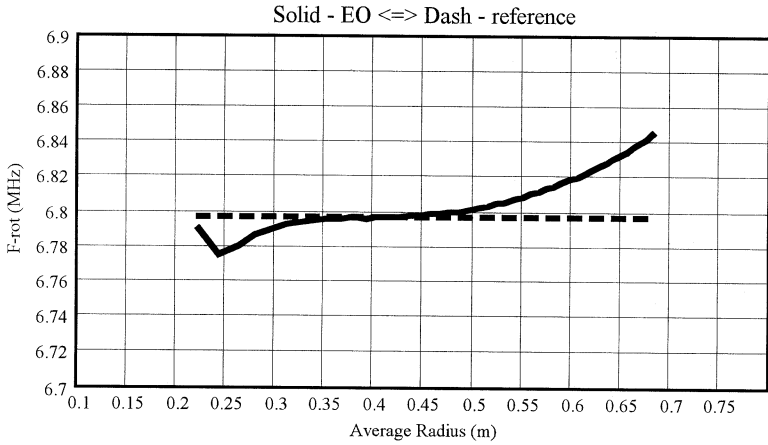


Рис. 4. Частота обращения частиц на замкнутых орбитах. Сплошная линия соответствует полученному расчетному полю с последующей его изохронизацией. Пунктирная линия – требуемая частота

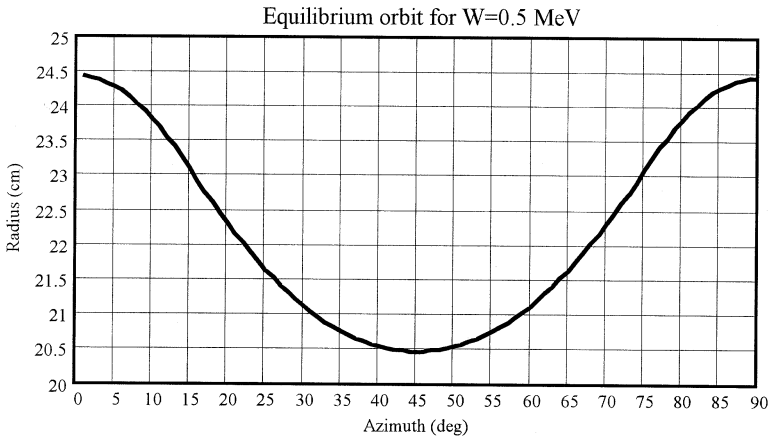


Рис. 5. Замкнутая равновесная орбита для энергии инжекции частиц = 0,5 МэВ

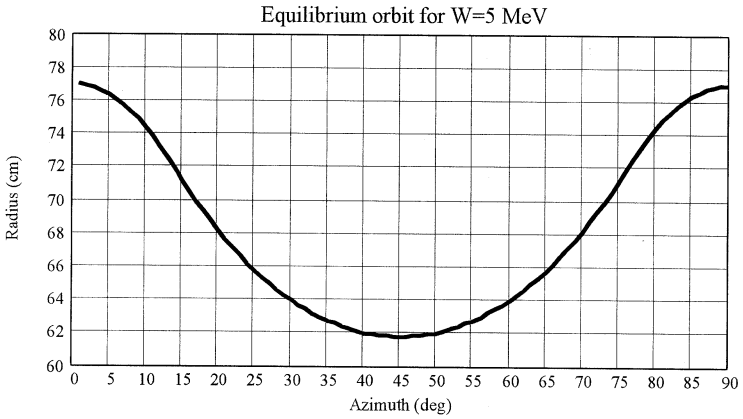


Рис. 6. Замкнутая равновесная орбита для конечной энергии частиц = 5 МэВ

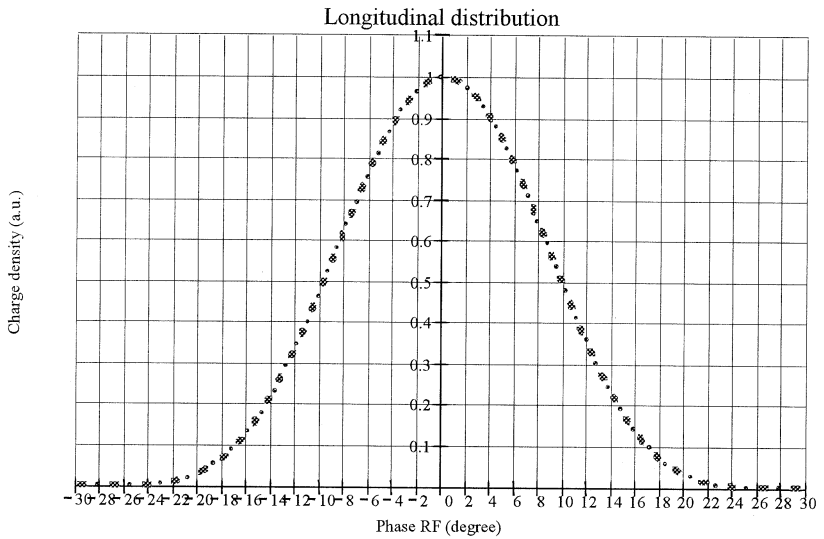


Рис. 7. Начальное распределение частиц в пучке по фазам ВЧ для $\rho_{\text{eff}}=32^\circ$ ($\Delta\phi=20^\circ$ FWHM)

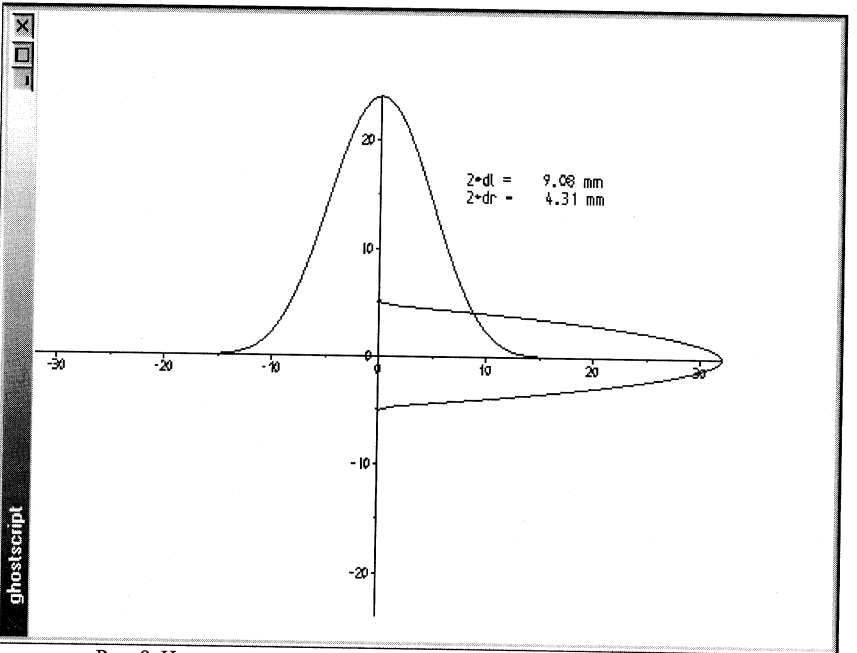
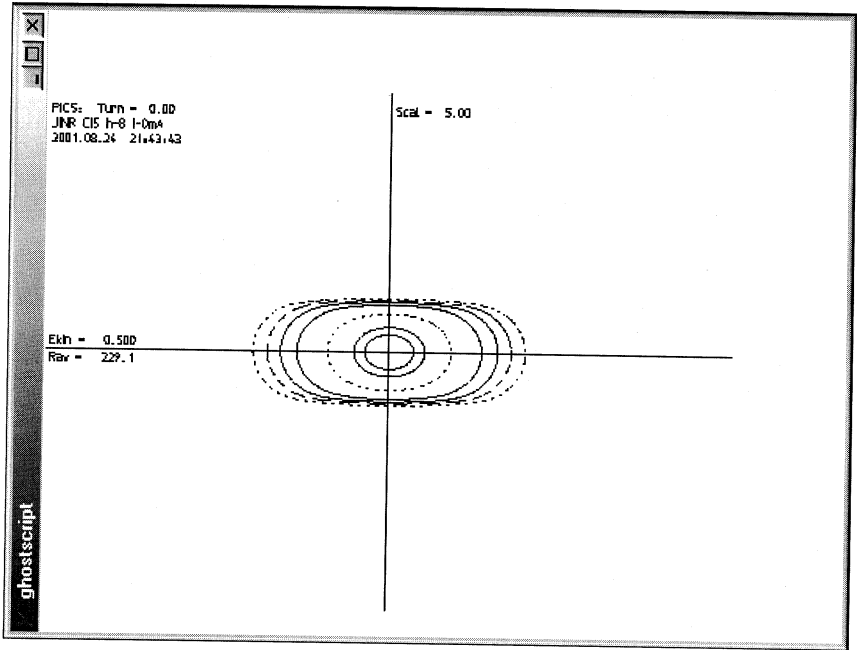


Рис. 8. Начальное распределение частиц в пучке по радиусу и азимуту

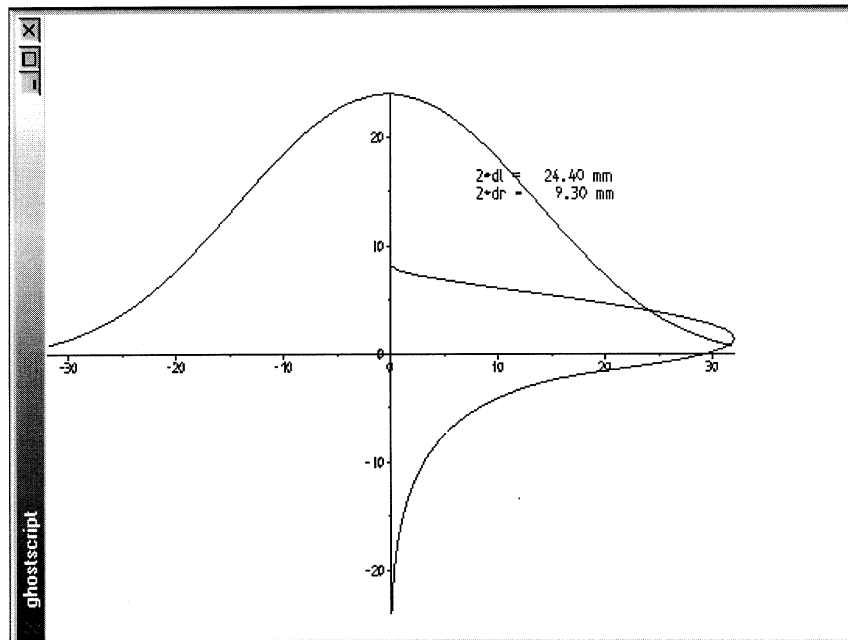
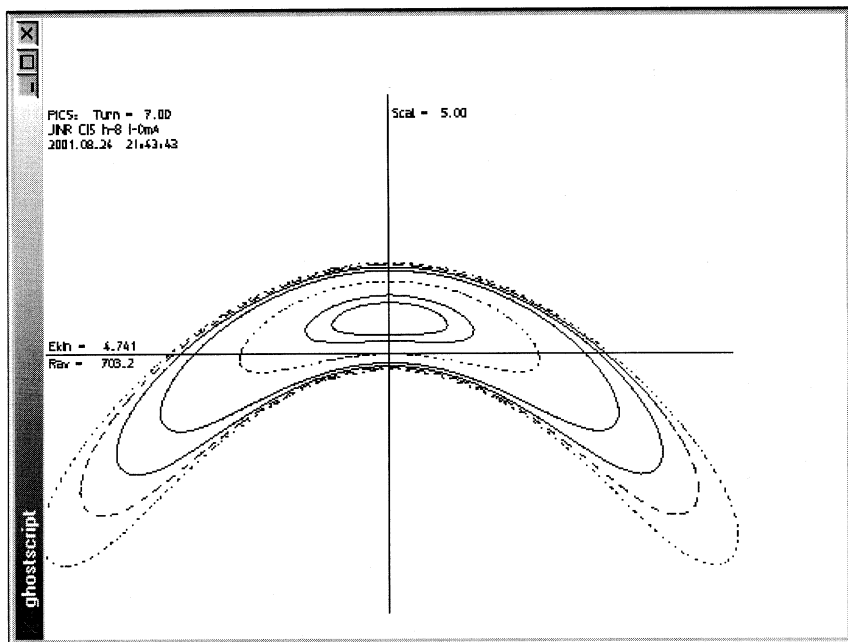


Рис. 9. Конечное распределение частиц в пучке при $I=0$ мкА

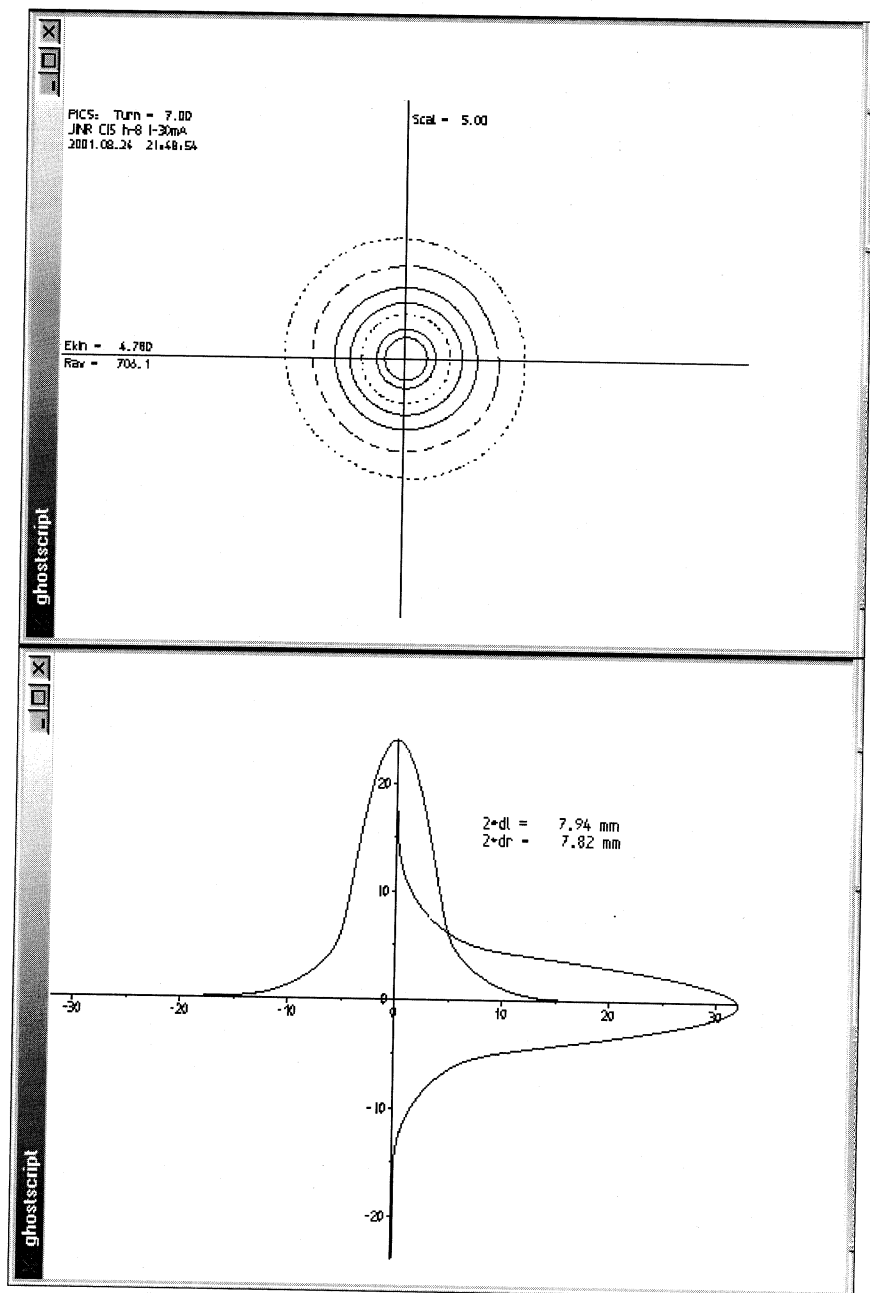


Рис. 10. Конечное распределение частиц в пучке при $I=30$ мкА

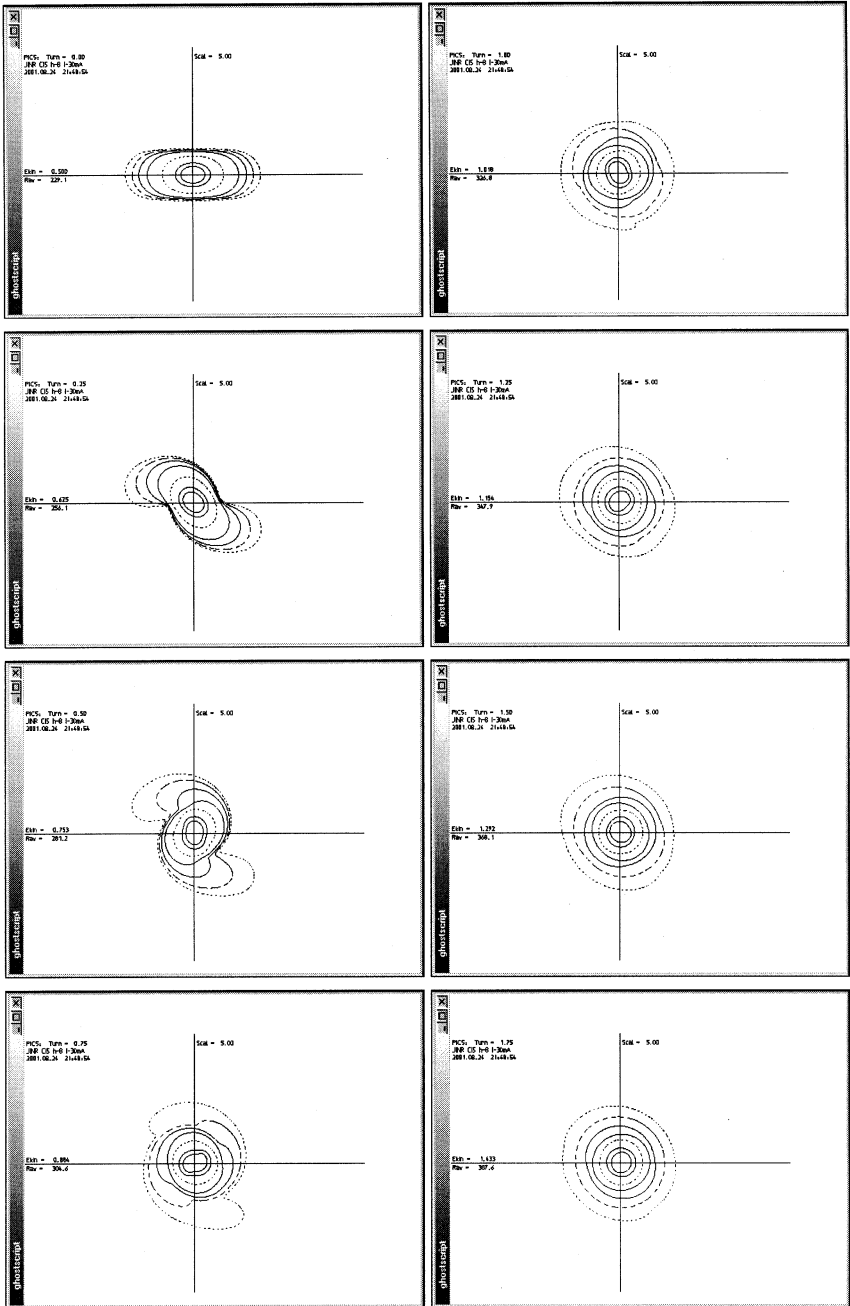


Рис. 11. Формирование “круглого” пучка в течение 1 - 2 оборотов при интенсивности 30 мА

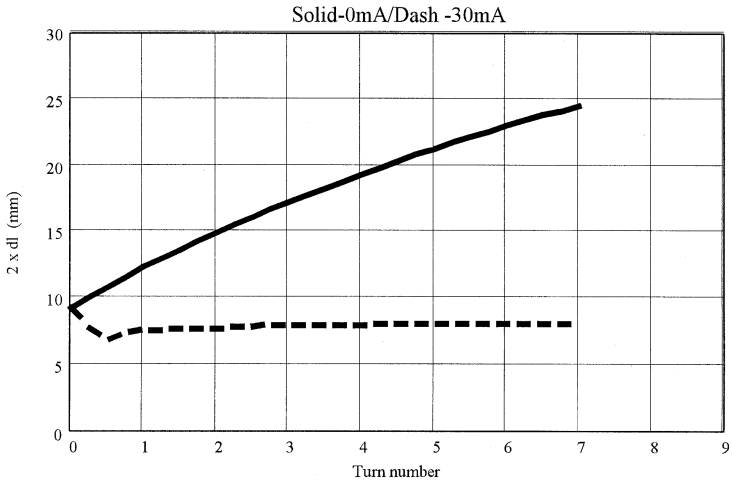


Рис. 12. Азимутальный размер пучка (2 стандартных отклонения). Сплошная линия – 0 мА, штриховая – 30 мА

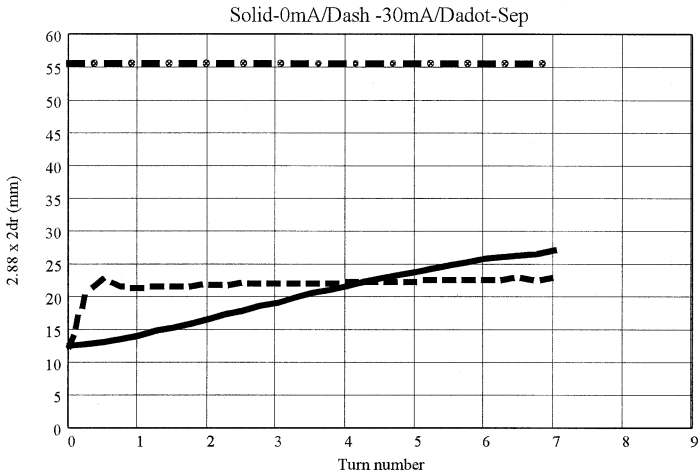


Рис. 13. Эффективный радиальный размер пучка (2x2,88 стандартных отклонения). Сплошная линия – 0 мА, пунктирная линия – 30 мА, штрихпунктирная – радиальное расстояние между двумя соседними орбитами на конечном радиусе

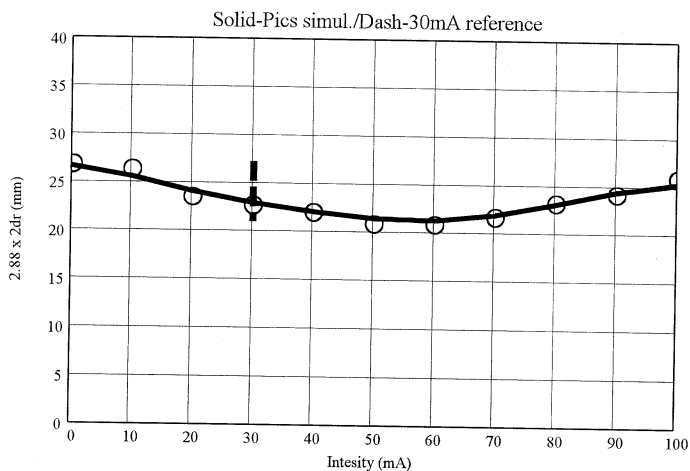


Рис. 14. Зависимость эффективного радиального размера пучка ($2 \times 2,88$ стандартных отклонения) в конце ускорения от интенсивности

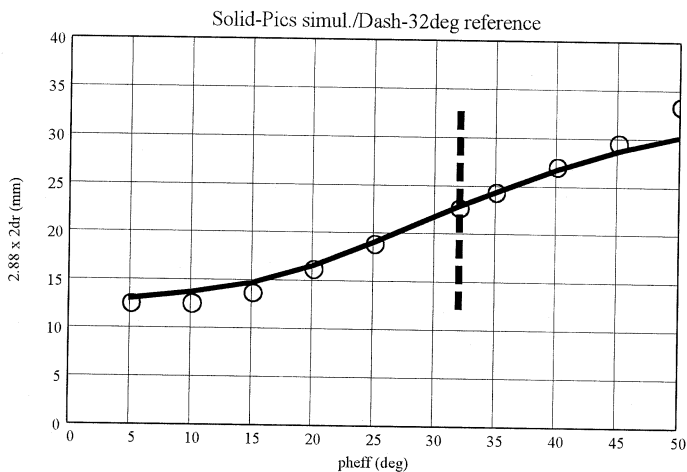


Рис. 15. Зависимость радиального размера банча ($2 \times 2,88$ стандартных отклонения) в конце ускорения от эффективного фазового размера инжектируемого пучка

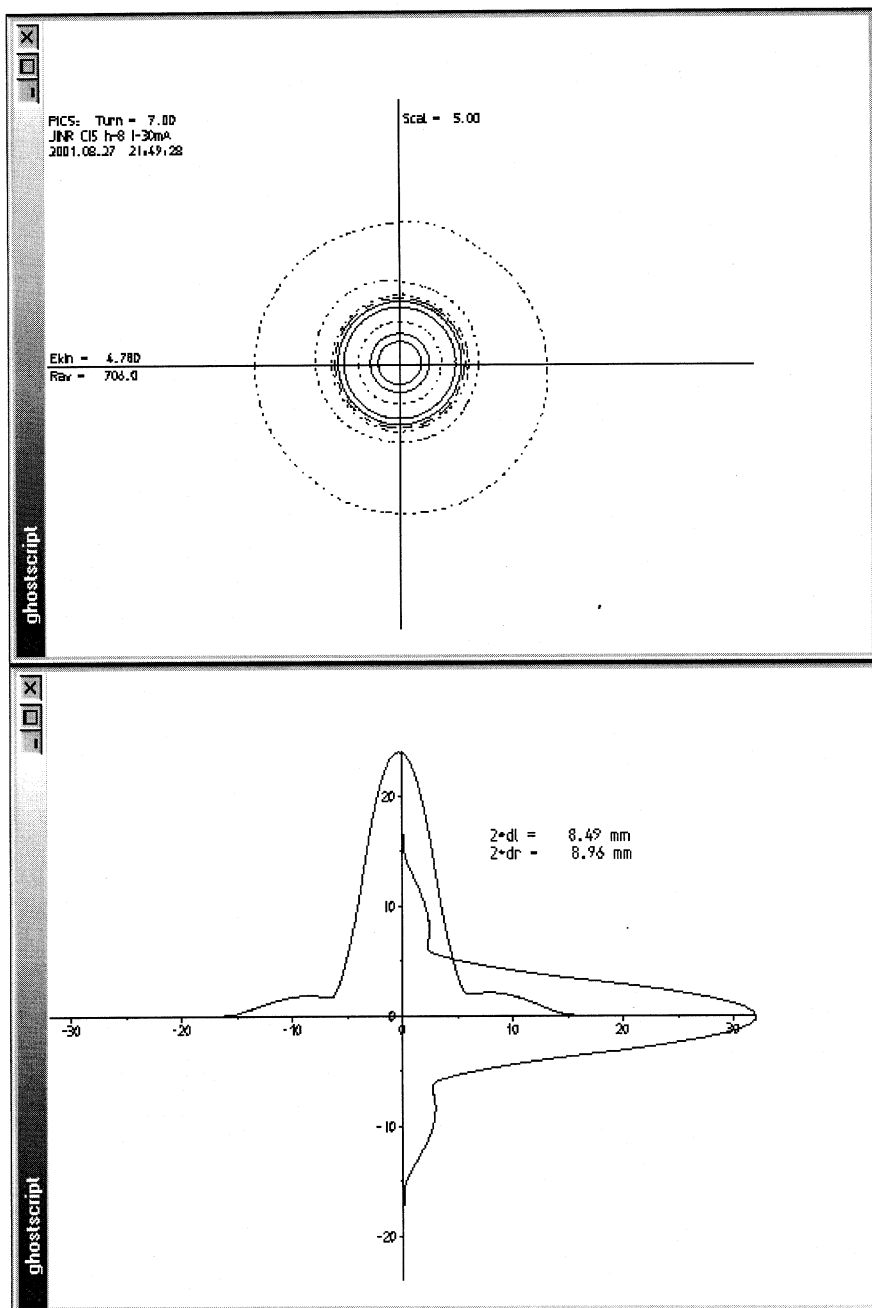


Рис. 16. Конечное распределение частиц в пучке при $I=100$ мА

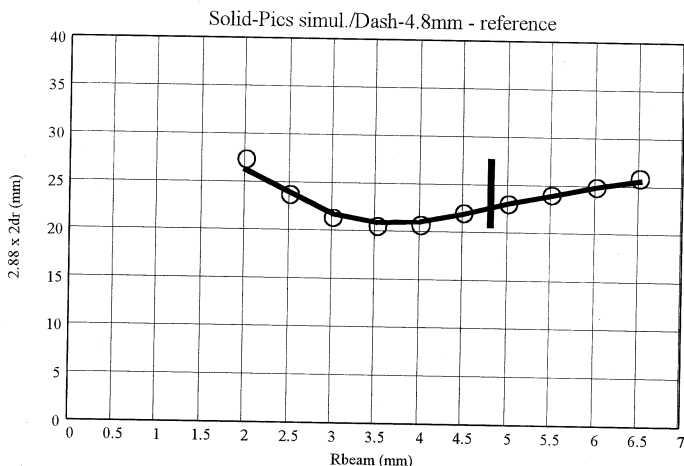


Рис. 17. Зависимость радиального размера пучка ($2 \times 2,88$ стандартных отклонения) в конце ускорения от эффективного радиального качества инжектируемого пучка

Список литературы :

- 1 О.В. Савченко "Предложения по новому варианту внешней инжекции фазотрона ОИЯИ и возможностям его реализации". Внутренний отчет, Дубна, 26 ноября 1999 г.
- 2 О.Н. Борисов, Л.М. Онищенко, ОИЯИ, Р9-97-282, Дубна 1997 г.
- 3 L.Onischenko, O.Borisov. "External Injection into the JINR Phasotron – Computer Simulation". In: Proc.of the EPAC-2000, 7th European Particle Accelerator Conference, 26 – 30 June 2000, p.569.
- 4 Th Stambach. "High Intensity Problems, revisited or Cyclotron Operation beyond Limits". In: Proc. Of the 15th Int. Conf., Caen, 1998 (369).
- 5 С.Б.Ворожцов, Г.А.Карамышева, Л.М.Онищенко. "Эффекты пространственного заряда в циклотронах". В трудах XVII Совещания по ускорителям заряженных частиц, г.Протвино, 16 – 20 октября 2000 года.
- 6 Chabert A., Prome M., In Proc. of the Conf. On Accel. Design and Oper., Berlin, 1984,p.164.
- 7 E.Baron et al."High Intensity and Space charge Problems at GANIL". In: Proc. of the 11th Int. Conf., Ionics,Tokyo, 1987 (234).
- 8 S. Adam: "Calculation of Space Charge Effects in Isochronous Cyclotrons", In: Proceedings of the 1985 Particle Accelerator Conference, Vancouver, IEEE NS 32-5, p 2507
- 9 S. Adam: "Space Charge Effects in Cyclotrons - From Simulations to Insights" In: Proc. of the 14th Conference "Cyclotrons and their Applications", Cape Town, South Africa,1995, p446
- 10 А.С.Ворожцов, С.Б.Ворожцов, Л.М.Онищенко. "Расчет магнита циклотрона – инжектора для фазотрона ОИЯИ". Сообщение ОИЯИ, Р9-2000–116, ОИЯИ, Дубна, 2000.
- 11 Ворожцов А.С. и др. "Расчет магнитного поля циклотрона-инжектора для фазотрона ОИЯИ", Р9-2001-194, Дубна, 2001.
- 12 Th.Stammbach et al'. "The PSI 2mA Beam and Future Applications" In: Proc. of the CYCLOTRONS 2001 Int. Conf. Conference on Cyclotrons and their Applications, May 12-17, 2001 East Lansing, MI, USA, A-2.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 сентября 2001 года.

Ворожцов А.С. и др.

P9-2001-195

Эффекты продольного пространственного заряда пучка
в циклотроне-инжекторе для фазотрона ОИЯИ

Одним из вариантов увеличения на порядок интенсивности протонного пучка фазотрона является внешняя инжекция частиц из секторного высокоэнергетического циклотрона на энергию 3–5 МэВ. Повышенная требуемая интенсивность пучка циклотрона предполагает проведение отдельного исследования динамики частиц с учетом их собственных полей. Эффектам продольного пространственного заряда должно быть уделено особое внимание в силу отсутствия продольной фокусировки в изохронных циклотронах. В результате численного моделирования динамики пучка в настоящей работе показано, что для выбранных параметров циклотрона не наблюдается ограничение по предельной интенсивности со стороны продольного пространственного заряда частиц.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2001

Перевод авторов

Vorojtsov A.S. et al.

P9-2001-195

Longitudinal Beam Space Charge Effects in the Cyclotron-Injector
of the JINR Phasotron

One of the methods for increasing the proton beam intensity in the JINR phasotron is an external particle injection from a high-current sector cyclotron for the proton energy of 3–5 MeV. The required high beam intensity of the cyclotron implies a dedicated beam dynamics study with the particle self-fields induced. Special attention should be paid to longitudinal space charge effects since there is no longitudinal focusing in isochronous cyclotrons. As a result of the computer simulation of the beam dynamics, it was shown that there is no beam intensity limitation from the longitudinal space charge effects for the selected parameters of the cyclotron.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2001

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

Подписано в печать 02.11.2001

Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. л. 1,75

Тираж 280. Заказ 52933. Цена 1 р. 75 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области