

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

В 751

P9-88-365

**С.Б.Ворожцов, А.А.Глазов, В.П.Дмитриевский,
М.Б.Калинкина, В.И.Лепилов, Л.М.Онищенко,
А.Н.Сафонов, Н.Г.Шакун**

**ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ФОКУСИРОВКА ПУЧКА
ФАЗОТРОНА ОИЯИ**

1988

ВВЕДЕНИЕ

Одна из причин ограничения интенсивности пучка на первых оборотах (20-30 об.) в центре фазотрона ОИЯИ связана с потерями частиц по аксиальному движению. Увеличение эффективного среднеквадратического отклонения частиц от геометрической медианной плоскости ($Z = 0$) зависит при заданной величине аксиальной фокусировки от всевозможных искажений медианных поверхностей электрического и магнитного полей, а также от рассогласования инжектируемого эмиттанта пучка с аксептансом первых оборотов ускорителя (инжекция под углом, сдвиг центра щели источника ионов по отношению к геометрической медианной плоскости). Все эти эффекты усиливаются также за счет ослабления фокусировки под действием пространственного заряда пучка. В результате возникает так называемая "динамическая волна", то есть когерентные аксиальные колебания с набором частот, которые определяются разбросом начальных фаз частиц относительно ускоряющего поля. Этот эффект был обнаружен на ускорителе в результате измерений многоламельными пробниками, а также с помощью "автографов" пучка.

ФОКУСИРУЮЩИЙ ЭЛЕКТРОД

Введение электростатической фокусировки направлено на снижение потерь частиц по аксиальному движению в центре фазотрона ОИЯИ. В работе^{1/} для фокусировки применялось азимутально среднее значение E_z . В рассматриваемом устройстве (рис. 1) используется знакопеременная фокусировка. В отличие от того, что предлагается в^{2/}, за счет радиальных фокусирующих зазоров уменьшено воздействие устройства на фазовое движение частиц. Кроме того, уменьшена аксиальная апертура электродов, что позволяет снизить примерно в 2 раза величину потенциала, подаваемого на фокусирующий электрод.

Для осуществления аксиальной фокусировки пучка электростатическим полем предложена модификация противодуантной рамки в исходной геометрии электродов в центре ускорителя^{3/} путем введения зазоров таким образом, как это показано на рис. 1. При этом на фокусирующий электрод подается постоянное отрицательное напряжение. Полученные из расчетов оптимальные параметры устройства представлены в табл. 1.

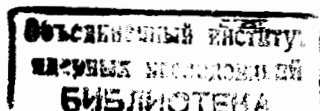


Таблица 1

1. Отрицательное напряжение на фокусирующих электродах	$V_{\text{Фоc}} < 10 \text{ кВ}$ (номинальное 4 кВ)
2. Угловой размер	$\Delta\theta_{\text{Фоc}} = 90^\circ$
3. Азимутальное положение относительно оси X	$\theta_{\text{Фоc}} = -90^\circ$
4. Аксиальная апертура в зависимости от радиуса	$D_{\text{Фоc}}(R) = 3,6 \div 7 \text{ см}$
5. Расстояние между электродами и рамкой	$l_{\text{Фоc}} = 1 \div 3 \text{ см}$
6. Расстояние между филлером дуанта и рамкой	$l = 5 \text{ см}$
7. Отрицательное напряжение смещения на дуанте	$V_{\text{см}} = 2 \text{ кВ}$
8. Радиальные размеры электрода	$R_{\text{Фоc}} = 40 \text{ см}$

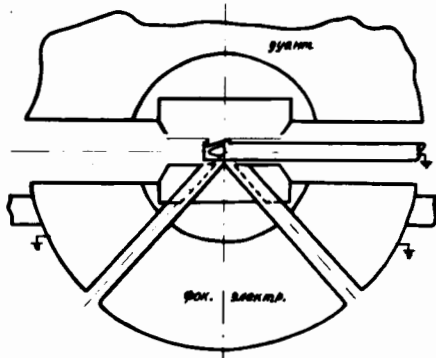


Рис. 1. Схема центральной области фазотрона с фокусирующими электродами.

РАСЧЕТ ФОКУСИРОВКИ

Использование электрической фокусировки приводит согласно расчетам к существенному (примерно в 2 раза) уменьшению эффективного размера пучка и снижению Z-потерь частиц (см. рис. 2, 3).

Фокусировка приводит к некоторому росту амплитуд свободных радиальных колебаний частиц — до $A_{R \text{ уст}} \approx 2 \text{ см}$ вместо 1,45 см (рис. 4). Как показали расчеты, для увеличенной амплитуды $V_{\text{MD}} \leq 50 \text{ кВ}$ требуется большее значение фокусирующего напряжения, $V_{\text{Фоc}} \leq 10 \text{ кВ}$, с целью обеспечения прежнего уровня аксиального сжатия пучка. (Увеличение V_{MD} приводит к связанному с искажениями геометрии ВЧ-системы росту воздействия на пучок, которое усиливается эффектом пространственного заряда).

Из рис. 3б также видно, что фокусирующий электрод наряду с подачей отрицательного смещения на дуант оказывает влияние на фазовое движение частиц (уменьшается набор энергии при одинаковом по сравнению с исходным случаем числе оборотов), что требует исследования изменений размеров и положения области захвата по фазово-

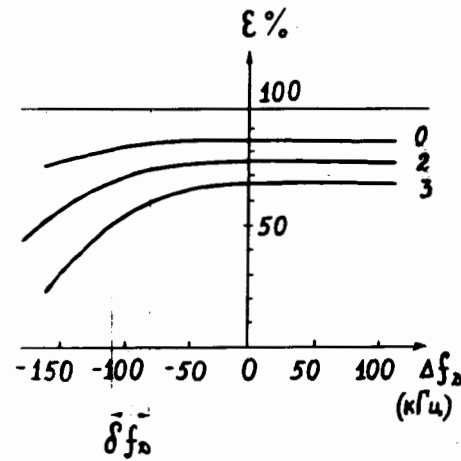


Рис. 3. а — увеличение аксиальных размеров пучка за счет искажений медианных поверхностей электрического и магнитного полей, 1, 3 — из таблицы 2. б — расчетное уменьшение аксиальных размеров пучка при воздействии системы электростатической фокусировки. 2, 3 — из таблицы 2.

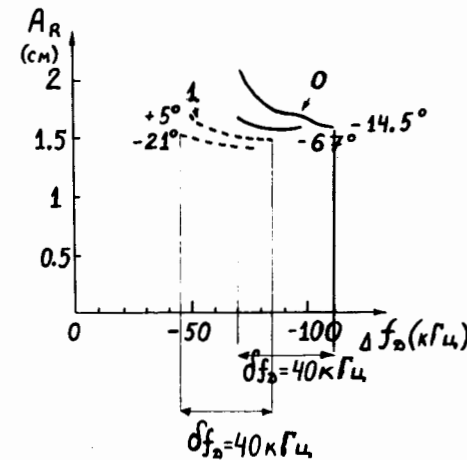


Рис. 2. Эффективность прохождения пучком 17 оборотов при реальной апертуре 36 мм, $V_{\text{MD}} = 30 \text{ кВ}$. 0, 2, 3 — из таблицы 2.

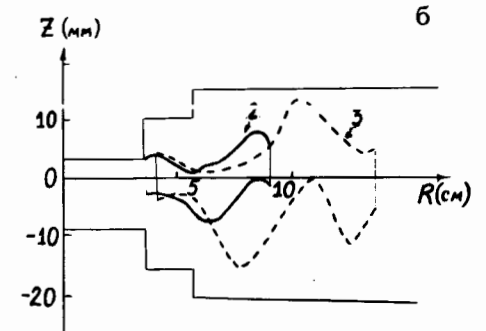
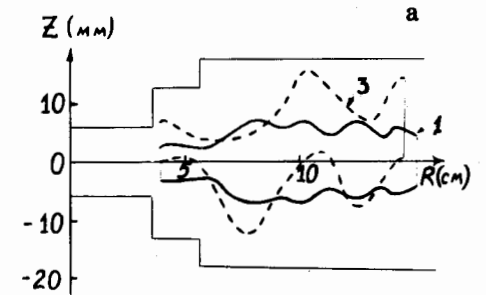


Рис. 4. Рост амплитуд свободных радиальных колебаний при воздействии системы электростатической фокусировки. 0, 1 — из таблицы 2. Кривые соответствуют различным, помеченным на графике начальным фазам движения частиц.

Таблица 2

Параметры	Обозначение	0	1	2	3
Напряжение на фокусирующих электродах	$V_{\text{Фос}}$ (кВ)	-4	0	-4	0
Напряжение смещения на дуанте	$V_{\text{см}}$ (кВ)	-2	0	-2	0
Смещение в аксиальном направлении электрической медианной поверхности	$Z_{\text{см}}$ (мм)	0	0	-3	-3
Искажение медианной поверхности магнитного поля	B_R (Гс)	0	0	$\neq 0$	$\neq 0$
Максимальное отклонение пучка в аксиальном направлении	Z_{max} (мм)	5	6,25	8,12	12,6

му движению в новой ситуации. Необходимо также сделать оценки требуемых коррекций частотной программы на время захвата и уровня магнитного поля для компенсации этого эффекта (согласование по начальной частоте захвата и по величине производной I_D в диапазоне захвата).

ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ПУЧКЕ

Воздействие системы электростатической фокусировки определялось экспериментально по перераспределению частиц на верхней и нижней (I_1, I_3) ламелях трехламельного пробника. Это позволило получить оценку в относительных единицах амплитуды "динамической волны" (ДВ) при заданной аксиальной фокусировке. Из рис. 5а видно, что при наличии фокусирующего электрода с оптимальным в данном случае потенциалом $V_{\text{Фос}} = -4,6$ кВ амплитуда ДВ снижалась в 2-3 раза. Попытка коррекции ДВ при помощи азимутально-среднего радиально-го магнитного поля B_R (ток в катушке коррекции $I_{\text{к1}} = 4,2$ А) приводила лишь к увеличению амплитуды ДВ (рис. 5а, кривая 1), что связано с разбросом частот аксиальных свободных колебаний в пучке. Аналогичный результат получен в расчетах. Кривая 2 на рис. 5а соответствует случаю предельного значения интенсивности пучка при токе дуги $I_D = 1$ А и отсутствии электростатической фокусировки ($V_{\text{Фос}} = 0$).

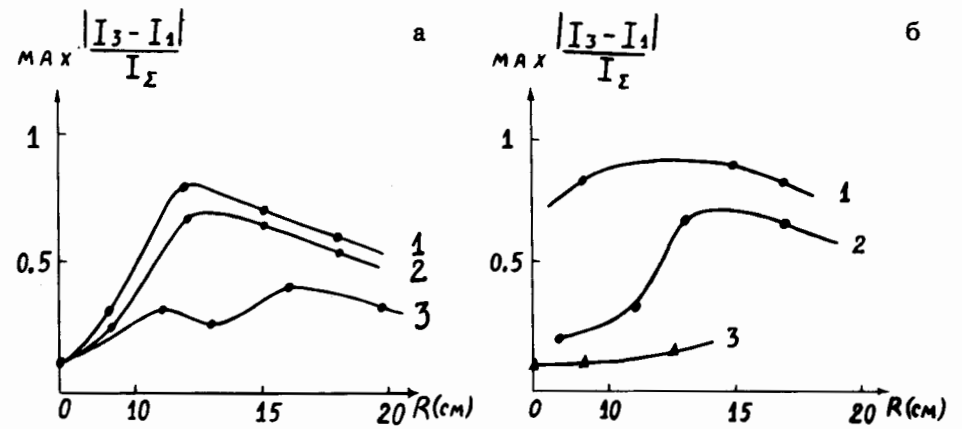
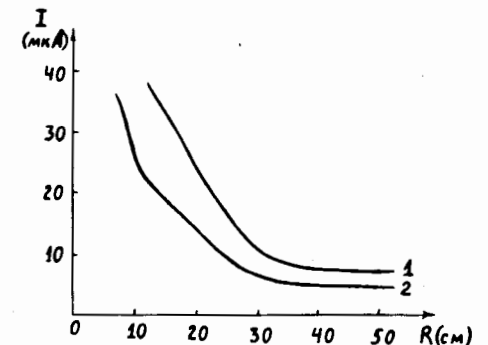


Рис. 5. а - перераспределение тока пучка на трехламельном пробнике при непрерывном токе дуги $I_D = 1$ А, $V_{\text{MD}} = 40$ кВ. 1 - $V_{\text{Фос}} = 0$ кВ, $I_{\text{к1}} = 4,2$ А; 2 - $V_{\text{Фос}} = 0$ кВ; 3 - $V_{\text{Фос}} = -4,6$ кВ. б - перераспределение тока пучка на трехламельном пробнике при импульсном токе дуги $I_D = 5$ А, $V_{\text{MD}} = 40$ кВ. 1 - $V_{\text{Фос}} = 0$ кВ; 2 - $V_{\text{Фос}} = -4$ кВ; 3 - $V_{\text{Фос}} = -10$ кВ.

Таким образом, при данной геометрии центра и амплитуде ДВ, соответствующей кривой 2 на рис. 5а, увеличение I_D не приводит к росту интенсивности пучка из-за аксиальной дефокусировки частиц за счет пространственного заряда.

Введение фокусирующего электрода позволяет поднять предельное значение тока дуги до $I_D = 5$ А (рис. 5б), что приводит к соответствующему возрастанию предельной по пространственному заряду интенсивности пучка в 1,5-3 раза (рис. 6, 7) для различных значений амплитуды ВЧ. Снижение относительного прироста интенсивности за счет электростатической фокусировки при увеличении амплитуды ускоряющего напряжения V_{MD} объясняется тем, что при этом растет воздействие на пучок, связанное с искажениями медианной плоскости электрического поля. Это обстоятельство требует соответствующего роста потенциала $V_{\text{Фос}}$ на фокусирующей

Рис. 6. Спад тока пучка по радиусу при $V_{\text{MD}} = 40$ кВ, $F_{\text{mod}} = 250$ Гц, $T_D = 80$ мкс. 1 - $V_{\text{Фос}} = -4$ кВ; 2 - $V_{\text{Фос}} = 0$ кВ.



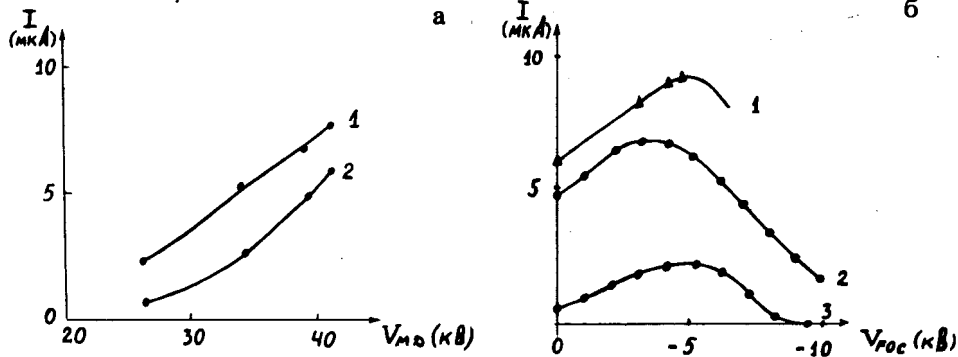


Рис. 7. а – зависимость тока пучка от ускоряющего напряжения при $R = 60$ см, $F_{\text{mod}} = 250$ Гц, $I_{\text{Д}} = 8$ А. 1 – $V_{\text{Foc}} = -4$ кВ; 2 – $V_{\text{Foc}} = 0$ кВ. б – зависимость интенсивности от фокусирующего напряжения на $R = 60$ см. 1 – $V_{\text{MD}} = 42$ кВ; $F_{\text{mod}} = 400$ Гц; 2 – $V_{\text{MD}} = 40$ кВ, $F_{\text{mod}} = 250$ Гц; 3 – $V_{\text{MD}} = 25$ кВ, $F_{\text{mod}} = 250$ Гц.

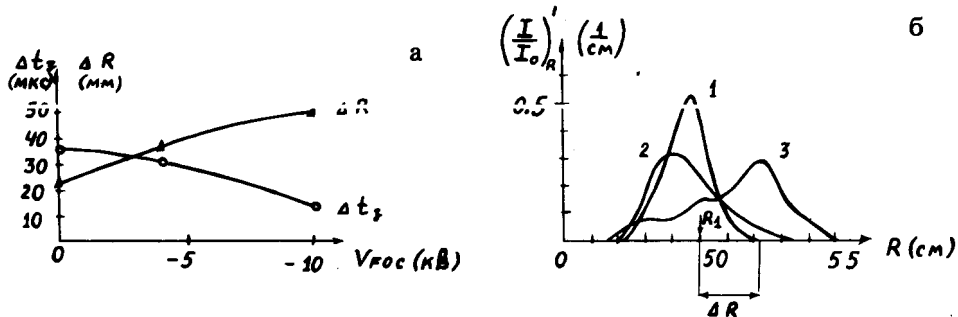
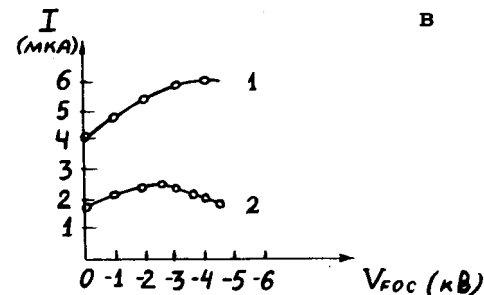


Рис. 8. а – влияние фокусировки на время захвата и радиальное качество пучка при $I_{\text{Д}} = 5$ А, $F_{\text{mod}} = 250$ Гц. б – измерение радиальных амплитуд частиц методом "теней". 1 – $V_{\text{Foc}} = 0$ кВ; 2 – $V_{\text{Foc}} = -4$ кВ; 3 – $V_{\text{Foc}} = -10$ кВ. в – зависимость интенсивности от фокусирующего напряжения. 1 – $V_{\text{MD}} = 37$ кВ, $F_{\text{mod}} = 250$ Гц, $R = 60$ см; 2 – $V_{\text{MD}} = 37$ кВ, $F_{\text{mod}} = 250$ Гц на выводе пучка из камеры.



щих электродах. Однако увеличение V_{Foc} ограничено двумя факторами: снижением времени захвата (Δt_3) и ростом амплитуд свободных радиальных колебаний частиц (рис. 8а). Время захвата определялось экспериментально путем смещения импульса потенциала, подаваемого для зажигания дуги источника, относительно ВЧ-программы. Оценка радиальных амплитуд выполнялась методом "теней" на радиусе вне зоны первого фазового колебания частиц. На рис. 8б приведены данные измерений на неподвижном пробнике. На рис. 8а представлены результаты оценки радиальных амплитуд по этим измерениям. Перераспределение спектра частиц по амплитудам свободных радиальных колебаний приводит к снижению эффективности вывода пучка из камеры ускорителя. Оптимальное значение V_{Foc} по выводной системе изменяется от значения -4 кВ, при котором обеспечивается 50-процентное увеличение внутреннего пучка, до $-2,5$ кВ, что дает 30-процентное увеличение выведенного пучка. По-видимому, изменением положения канала, настроенного на оптимальное значение при $V_{\text{Foc}} = 0$, можно добиться лучшего использования прироста интенсивности внутреннего пучка за счет применения фокусирующего электрода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Введение системы электростатической фокусировки позволило ослабить влияние искажений медианной плоскости на пучок и подняло интенсивность пучка в 1,5 раза при амплитуде ускоряющего напряжения $V_{\text{MD}} \approx 40$ кВ. Достигнутая максимальная интенсивность внутреннего пучка составила 9,2 мкА при скорости вращения вариатора частоты $n = 2400$ об/мин.

2. Действие системы электростатической фокусировки ограничивается уменьшением времени захвата пучка и увеличением амплитуд радиальных колебаний частиц при возрастании потенциала на фокусирующем электроде.

3. Дальнейший рост интенсивности внутреннего пучка при данной амплитуде ВЧ возможен путем устранения погрешностей в геометрии электродов ВЧ-системы в центре ускорителя.

4. Изменение спектра частиц по радиальным амплитудам, вызываемое фокусирующим электродом, предполагает новую настройку положения выводного канала на оптимальное значение интенсивности пучка вне камеры ускорителя.

Авторы благодарны В.И.Данилову и М.М.Семенову за плодотворное обсуждение по теме работы и помощь при проведении исследований на пучке ускорителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов В.И. и др. ОИЯИ, Р-1853, Дубна, 1964.
2. Абросимов Н.К. и др. Препринт ЛИЯФ, №463, 1979.
3. Ворожцов С.Б., Шакун Н.Г. Сообщение ОИЯИ Р9-83-658, Дубна, 1983.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 мая 1988 года.

Ворожцов С.В. и др.
Электростатическая фокусировка
пучка фазотрона ОИЯИ

P9-88-365

Описывается система электростатической фокусировки пучка, разработанная для фазотрона ОИЯИ. Система электростатической фокусировки пучка установлена в центральную область фазотрона с целью снижения потерь частиц по аксиальному движению. Особенностью рассматриваемого устройства является наличие знакопеременной фокусировки. Она осуществляется за счет модификации противодеантной рамки путем введения радиальных фокусирующих зазоров. При этом на фокусирующий электрод подается постоянное отрицательное напряжение. Введение электростатической фокусировки позволило примерно в 2 раза уменьшить эффективный размер пучка и снизить Z-потери частиц. За счет этого интенсивность пучка поднялась в 1,5 раза при амплитуде ускоряющего напряжения примерно 40 кВ. Достигнутая максимальная интенсивность внутреннего пучка составила 9,2 мкА при скорости вращения варьатора частоты $n = 2400$ об/мин.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод О.С.Виноградовой

Vorozhtsov S.B. et al.
Electrostatics Beam for the JINR Phasotron

P9-88-365

Electrostatic beam focusing system for the JINR phasotron is described. The system is mounted into the centre of accelerator for reducing particle losses in axial motion. The peculiarity of the system is an alternating focusing. It is realized due to dummy dee modification by introducing the radial focusing gaps. The focusing electrode is at a constant negative voltage. Using the electrostatic focusing system allowed one to decrease twice effective dimension of beam and to reduce Z-losses of particles. As a result, the beam intensity increased by 1.5 times for amplitude of accelerating voltage of 40 kV. Maximum internal beam intensity achieved was 9.2 mA with rotation velocity of frequency variation of $n = 2400$ turns/min.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988