

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

B 751

P9-88-707

С.Б.Ворожцов, В.П.Дмитриевский, М.Б.Калинкина,
В.А.Саенко

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫВОДА ПУЧКА
ИЗ ДЦ-1 С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ
ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА

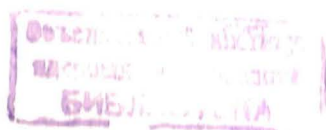
1988

Проектом мезонного и нейтронного генератора ОИЯИ предусмотрены разработка и моделирование ускорительного комплекса дейтронов на энергию 800-900 МэВ/нуклон при интенсивности пучка в диапазоне 1-100 мА¹¹. Для ускорения пучка дейтронов предполагается использовать циклотронные установки, в том числе ДЦ-1 (7,5-50 МэВ/нуклон). Поскольку речь идет о создании сильного циклотрона с интенсивностью, намного превышающей достигнутые в настоящее время где-либо в мире для такого класса ускорителей, то исследованию эффектов пространственного заряда пучка необходимо придавать первостепенное значение.

Некоторым аналогом ДЦ-1 с точки зрения динамики пучка может служить инжектор-II циклотрона PSI (SIN)¹³, где предельная интенсивность, около 2 мА, определяется действием пространственного заряда на продольное движение частиц при примерно 100-процентной эффективности. В табл. 1 приведены для сравнения некоторые параметры ДЦ-1 и инжектора-II PSI. Другие параметры, не приведенные в таблице, более или менее одинаковы с точки зрения сделанного

Таблица 1

	ДЦ-1	Инжектор-II PSI
1 Набор энергии за оборот (МэВ/нуклон)	0,5	1,0
2 Конечная энергия (МэВ/нуклон)	45-50	72
3 Конечный радиус (м)	1,1	3,0
4 Нормализованный эмиттанс ($\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$)	4	0,5
5 Диапазон энергий, где наиболее выражено влияние продольного пространственного заряда на энергетический разброс в пучке (МэВ)	7,5-12	0,9-12
6 Разделение соседних орбит на конечном радиусе за счет набора энергии (см)	0,5	1,6



ниже сравнения. Из табл. 1 видно, что, за исключением позиции 5, ситуация на действующем инжекторе-II PSI значительно более благоприятна для 100-процентного вывода сильноточного пучка в режиме ускорения с разделенными орбитами.

С учетом вышеприведенных соображений, а также отсутствия достаточно полного, на современном уровне, исследования эффекта "продольного" пространственного заряда для ДЦ-1 было предпринято численное моделирование динамики пучка ДЦ-1. Особое внимание уделено наиболее сложному моменту — проблеме 100-процентного вывода сильноточного пучка из камеры ускорителя.

УСЛОВИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчеты динамики пучка ДЦ-1 с учетом действия пространственного заряда выполнялись в основном по программам NAJO, JOAN, ANJO, любезно предоставленным доктором А.Шабером (ГАНИЛ, Франция)^{14/} и адаптированным в ОИЯИ на CDC-6500.

Комплекс программ является развитием системы CYCLOTRON^{15,6/} для моделирования на ЭВМ циклотронной установки. Система программ PERCYS для ПЭВМ "Правец-16" более подробно описана в отдельной публикации^{17/}. Исходные данные для расчетов параметров пучка, ВЧ-системы, магнитной системы ДЦ-1 приведены в таблицах 1, 2. При этом использовались работы^{11,2/} и последующие уточнения. Магнитное поле^{18/} задавалось в виде карты в полярной системе координат с шагом 3 см по радиусу и 0,5 градуса по азимуту. Уточнение азимутального среднего поля и приведение его к изохронному выполнялось численно при помощи программы ISO. Для моделирования пучка использовались 50-100 пробных частиц, равномерно распределенных по шестимерному фазовому объему.

Таблица 2

Параметры ДЦ-1, используемые для моделирования:
d1, d2 — дельта-электроды, FT — flat-top — резонатор

Параметры	Проектные значения	Введены в данной работе
1	2	3
Ускоряемая частица	D ₂ ⁺¹	—
Частота обращения частиц (МГц)	12,375	—
Энергия инжекции (МэВ/нуклон)	7,5	—

Продолжение таблицы 2

1	2	3	
Радиус инжекции (м) ("долина" между магнитами)	—	0,423	
Радиальный эмиттанс ($\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$)	5 мм x 6 мрад = 30		
Продольный эмиттанс ($\pi \cdot \text{град} \cdot \text{промилле}$)	13 град · 5 промилле = 65		
Вертикальный эмиттанс ($\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$)	5 мм · 4,8 мрад = 24		
Гармоника ВЧ	d1, d2	6	—
	FT	—	12
Частота (МГц)	d1, d2	74,25	—
	FT	—	148,5
Напряжение (кВ)	d1, d2	300	410
	FT	—	210
Фаза (градус)	d1, d2	—	0
	FT	—	92,2
Азимутальное положение резонаторов (градус)	d1	—	90
	d2	—	270
	FT	—	180
Угловое расстояние между серединами ускоряющих зазоров резонатора (градус)	d1, d2	20	—
	FT	—	10
Высота ускоряющего зазора (см)	d1, d2	4	—
	FT	—	2
Угловой размер ускоряющего зазора (градус)	d1, d2	4	—
	FT	—	2

С самого начала моделирования стало ясно, что для ускорения пучка с фазовым размером примерно 26° потребуется введение flat-top-резонатора¹⁹ для сведения энергетического разброса в пучке к минимуму. Использование второй гармоники flat-top-резонатора по отношению к частоте дельта-электродов привело к необходимости увеличения напряжения на дельта-электроде для сохранения заданного набора энергии за оборот.

МЕТОДЫ ВЫВОДА ПУЧКА

Вследствие того, что ни одна из применяющихся в ускорителях со стационарным магнитным полем систем вывода пучка не могла обеспечить 100-процентного вывода ускоренных частиц, вопрос об использовании циклических ускорителей для получения мощных пучков долгое время оставался проблематичным и предпочтение отдавалось линейным ускорителям.

В 1972 году в ОИЯИ был обнаружен эффект^{10,11}, основанный на существенной зависимости коэффициента расширения равновесных орбит от нелинейности в законе изменения основной гармоники магнитного поля (B_n -вывод). В результате соседние орбиты разделяются на несколько сантиметров, что позволяет использовать обычные электростатические или магнитные каналы для вывода пучка без потерь.

Другой метод расстановки равновесных орбит может быть основан на предложении Трипарда-Г. и Йохо В. об уменьшении частоты радиальных свободных колебаний Q_r (Q_r -вывод). В 1969 году ими было показано для циклотрона PSI, что при больших наборах энергии за оборот (около 1,8 МэВ) пучок быстро сдвигается в область краевого поля ускорителя, где Q_r падает от первоначального значения 1,6 до $Q_r = 1,1$ при минимальном смещении фазы частиц. Это позволяет увеличивать в 2 раза расстояние между соседними орбитами. На основе идеи Йохо В.¹² для ДЦ-1 было рассмотрено уменьшение зависимости от радиуса среднего по длине равновесной орбиты магнитного поля (рис. 1а). Для уменьшения фазового сдвига частиц в начальной по радиусу области, где изменялось поле, был организован положительный всплеск (бамп) магнитного поля величиной около 4 мТл. Это приводило к отводу фазы частиц в отрицательную область примерно на -30° относительно ВЧ-поля. Последующее снижение поля на орбите приводило, в свою очередь, к сдвигу фазы от -30° до $+30^\circ$, что вполне допустимо. В результате проведенной модификации поля было получено уменьшение Q_r . При этом значении Q_z ниже резонансного $Q_z = 1,5$ (рис. 1в) и обеспечивается устойчивость Z-движения частиц (рис. 1б). Так же, как и в B_n -выводе, пучок проходит через резонансное значение $Q_r = 1$. С этим, по-видимому, связана фиксация фазы когерентных радиальных колебаний частиц и ухудшение радиального эмиттанса пучка (как и в B_n -выводе) под воздействием асимметричной ВЧ-системы и нелинейности магнитного поля. Разделение двух соседних орбит в зоне вывода при указанной модификации поля показано на рис. 2а. Проекция фазового объема этих орбит на плоскости (энергия/нуклон —

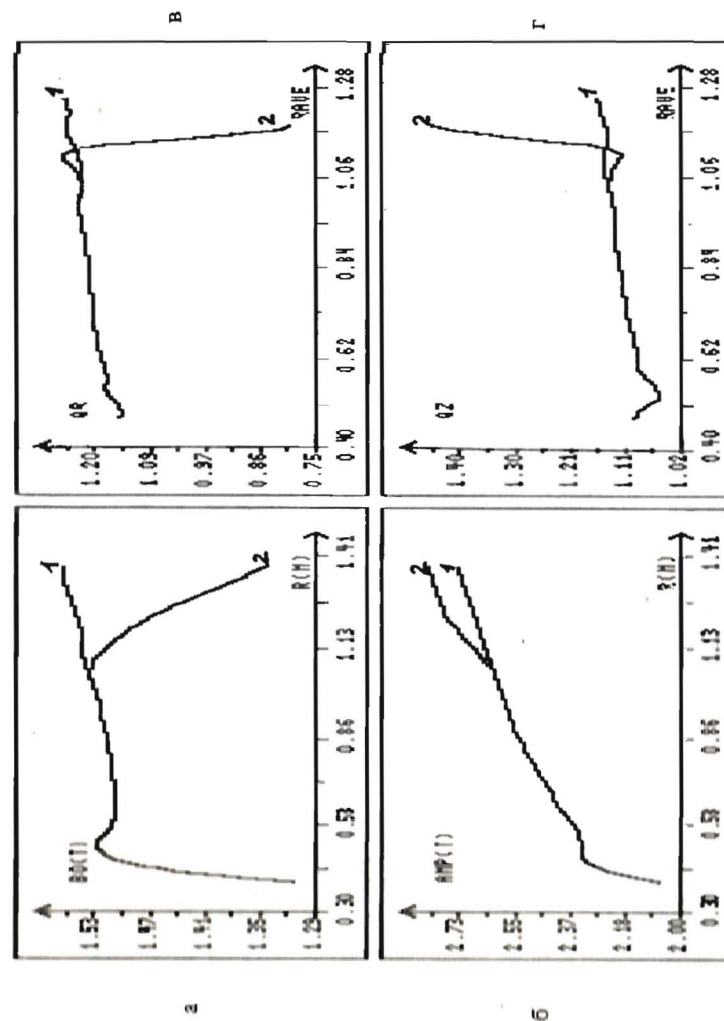


Рис. 1. а — азимутально-среднее магнитное поле; 1 — исходное поле; 2 — после модификации; б — амплитуда основной гармоники; в — частота свободных радиальных колебаний; г — частота аксиальных свободных колебаний.

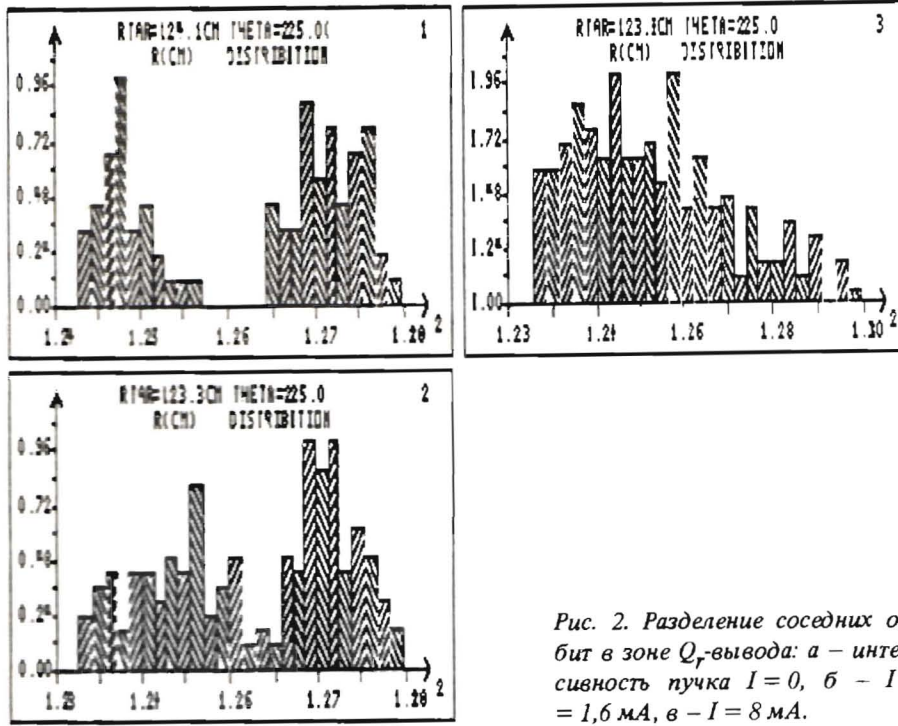


Рис. 2. Разделение соседних орбит в зоне Q_r -вывода: а - интенсивность пучка $I=0$, б - $I=1,6$ мА, в - $I=8$ мА.

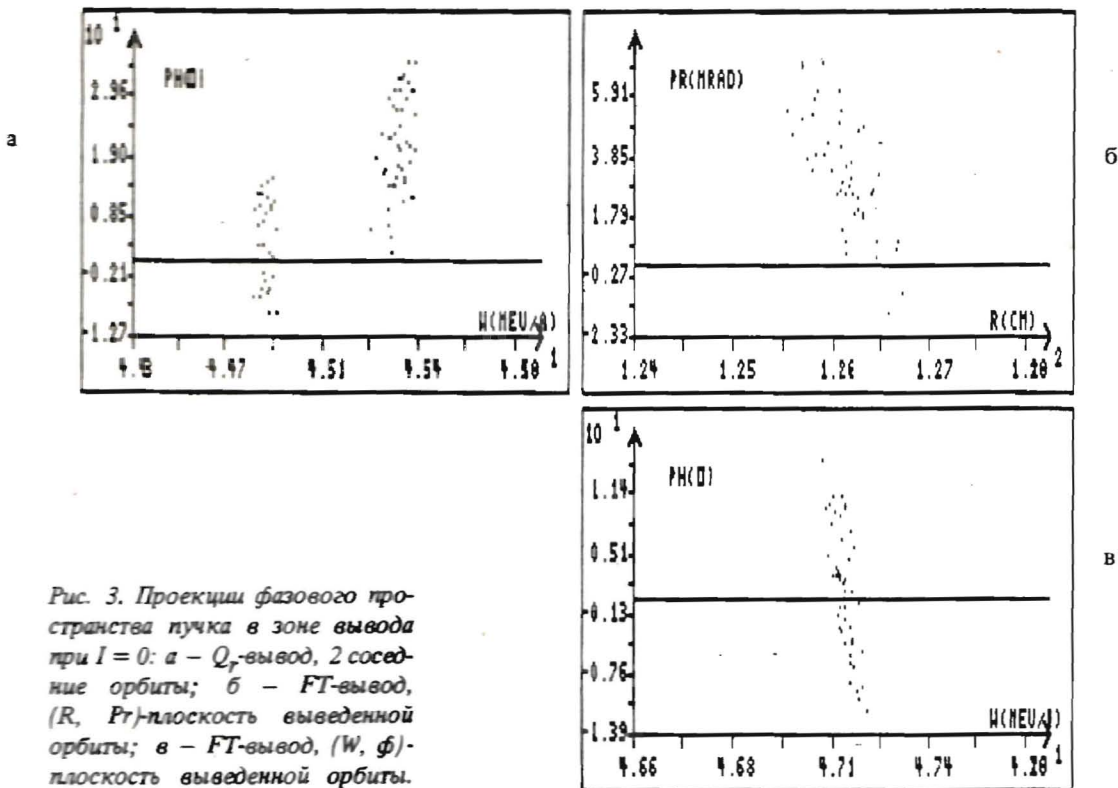


Рис. 3. Проекция фазового пространства пучка в зоне вывода при $I=0$: а - Q_r -вывод, 2 соседние орбиты; б - FT-вывод, (R, P_r) -плоскость выведенной орбиты; в - FT-вывод, (W, ϕ) -плоскость выведенной орбиты.

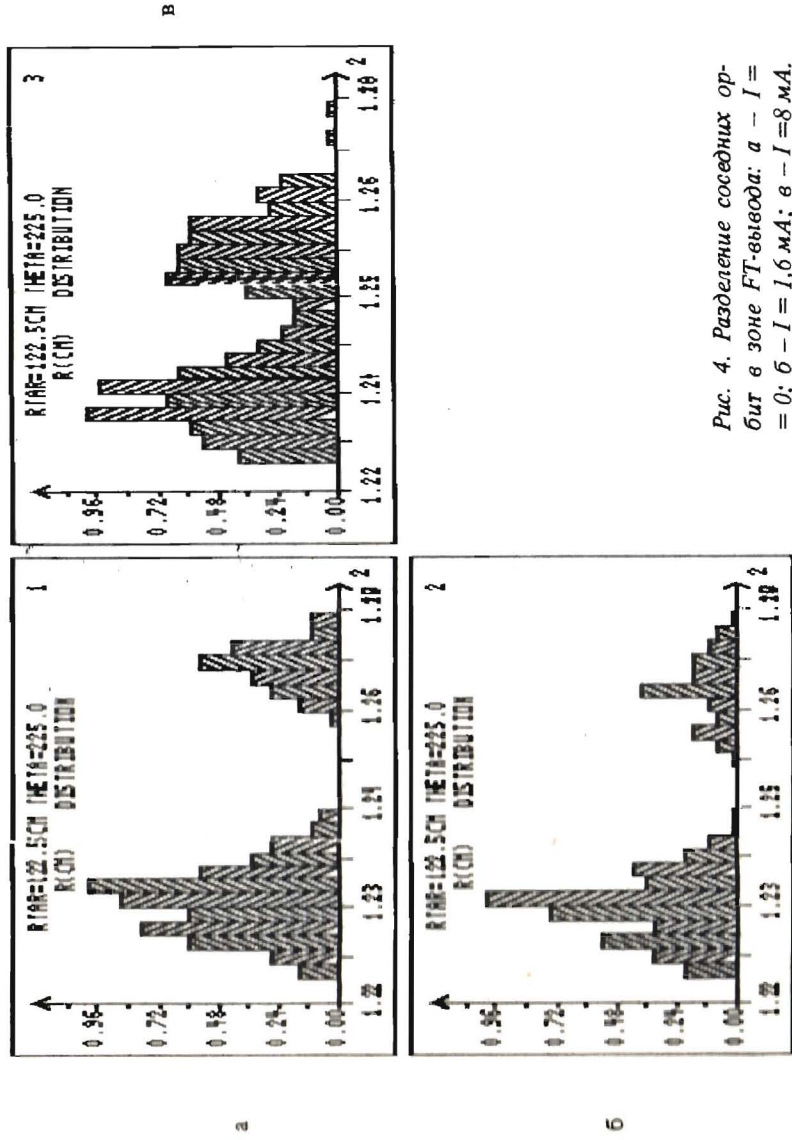


Рис. 4. Разделение соседних орбит в зоне FT-вывода: а - $I = 0$; б - $I = 1,6$ мА; в - $I = 8$ мА.

фаза относительно ВЧ-системы) приведена на рис. 3а. Видно, что радиальные размеры пучка выводимой орбиты несколько увеличились. Фазовый сдвиг частиц этой орбиты не превышает $+30^\circ$ (для сравнения, в V_p -выводе фазовый сдвиг достигает значений от -36° до $+36^\circ$).

Следующий рассмотренный метод вывода пучка из ДЦ-1 основан на использовании когерентных радиальных колебаний частиц (FT-вывод). Как известно¹³, при наличии одного flat-top-резонатора в кольцевом циклотроне разбаланс напряжений на резонаторах вызывает эффект, эквивалентный первой гармонике возмущения магнитного поля. В результате возникающих когерентных колебаний разделение соседних орбит в ДЦ-1 может достигать примерно 3 см. На рис. 4а для оптимального азимута показаны положения внутренних и выводимой орбиты. На рис. 3б, 3в приведены соответствующие проекции фазового пространства выведенного пучка.

Таким образом, для одночастичного рассмотрения (ток пучка приблизительно равен нулю) доказана возможность 100-процентного вывода пучка из ДЦ-1 Q_r -методом при значительно меньших модификациях основного магнитного поля, чем в V_p -выводе (в идеале - на краевом поле ускорителя), и FT-методом, где магнитное поле вообще не искажается. Для FT-метода flat-top-резонатор, необходимый в любом случае, становится главным устройством для раскачки радиальных колебаний. Управление положением азимутального угла, где реализуется максимальное разделение соседних орбит, может быть основано на использовании первой гармоники магнитного поля величиной около 0,01 Тл.

"ПРОДОЛЬНЫЙ" ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ЗАРЯД

Как уже упоминалось выше, для инжектора-II PSI с рекордной, экспериментально достигнутой интенсивностью пучка около 1 мА основным препятствием для увеличения тока является действие "продольного" пространственного заряда на энергетический разброс в пучке. В результате имеет место перекрытие по радиусу соседних орбит и становится невозможным избежать потерь частиц при выводе пучка. Основной эффект "продольного" заряда проявляет себя в диапазоне 1-12 МэВ/нуклон¹³, в дальнейшем идет некоторое уменьшение энергетического разброса в пучке¹⁴. Этот эффект показан на рис. 5. Результаты расчетов коррелируют с вышеназванными работами.

Влияние "продольного" заряда на разделение орбит в зоне вывода пучка проиллюстрировано на рис. 2, 4. Видно, что при $I = 1,6$ мА происходит перекрытие орбит в Q_r -выводе, но пучок еще можно выводить FT-методом. При $I = 8$ мА оба метода не работают. Очевидно, что отмеченная особенность действия "продольного" заряда при Q_r -выводе относится, как считает В.В.Кольга, и к V_p -выводу, в основе которого также лежит уменьшение Q_r (и, соответственно, увеличение коэффициента пространственного расширения орбит) и переход через резонансную зону $Q_r = 1$ при помощи модификации вариации магнитного поля.

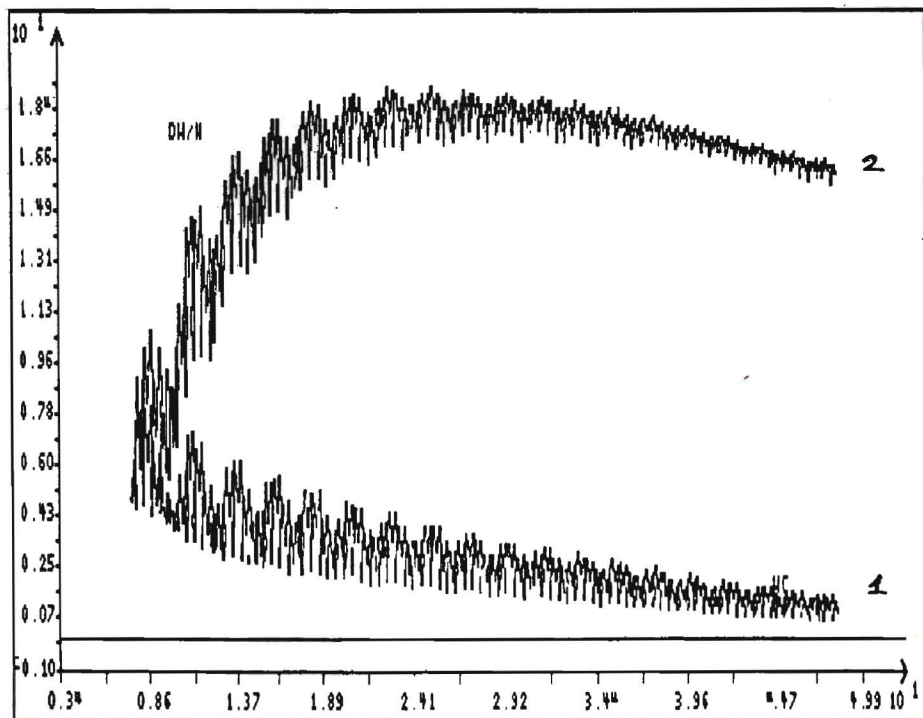


Рис. 5. Зависимость энергетического разброса в пучке (промилле) в процессе ускорения от начальной до конечной энергии (МэВ/нуклон): 1 – $I = 0$; 2 – $I = 8$ мА.

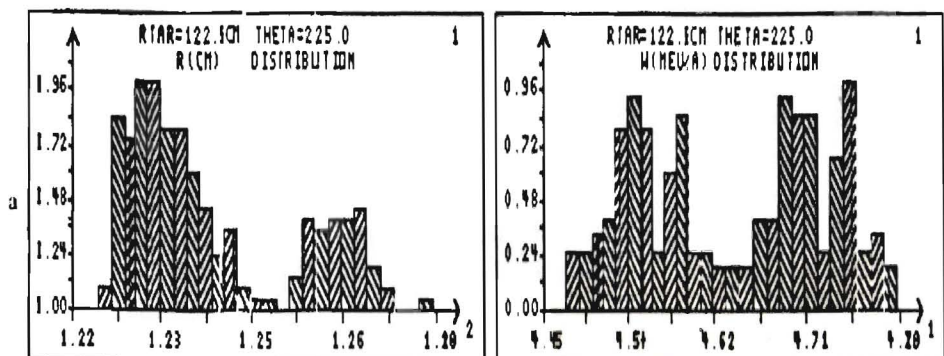


Рис. 6. Разделение орбит для $I = 8$ мА в зоне FT-вывода при смещении фазы FT-резонатора на 8° : а – распределение по радиусу; б – распределение по энергии.

Для компенсации энергетического разброса в пучке использовался рекомендуемый в ¹³ эффект "наклонного" flat-top воздействия, для чего находились оптимальные значения амплитуды напряжения и фазы FT-резонатора, приведенные в табл. 2. Результаты (рис. 2, 3, 4, 5) относятся к случаю оптимальных параметров FT-резонатора при нулевой интенсивности пучка. Настраивая режим FT-резонатора на определенную интенсивность пучка, можно достигнуть большего значения тока ускоренного пучка, при котором еще возможен 100-процентный вывод. На рис. 6 показано, что при сдвиге фазы FT-резонатора на 8° удается почти разделить орбиты при $I = 8$ мА, хотя энергетически орбиты уже "замазаны". Дальнейшее продвижение в этом направлении, быть может, возможно за счет куполообразного распределения амплитуды ускоряющего напряжения на дельта-электродах и FT-резонаторе ¹³. Что касается устойчивости пучка в процессе ускорения, то до интенсивности 100 мА потери частиц за счет эффектов пространственного заряда, как показано в ¹⁵, отсутствуют.

ВЫВОДЫ

1. В условиях 100-процентного вывода пучка в режиме ускорения с разделенными орбитами интенсивность ускоренных частиц в ДЦ-1 ограничена значением 1-1,5 мА по эффекту "продольного" пространственного заряда. Увеличение этой предельной интенсивности до 5-6 мА возможно за счет настройки параметров дельта-электродов и FT-резонатора на выбранном токе пучка.

2. Метод вывода пучка путем изменения Q_r за счет уменьшения среднего по длине орбиты магнитного поля (Q_r -метод) требует минимальной модификации исходного поля ускорителя (в идеале – вывод на краевом поле) и поэтому может оказаться предпочтительнее эффекта расширения орбит за счет изменения вариации магнитного поля (при низкой интенсивности пучка).

3. Вывод пучка с использованием когерентных радиальных колебаний частиц (FT-метод) предпочтительнее Q_r -метода ввиду более высокого предела интенсивности пучка по эффекту "продольного" пространственного заряда, а также отсутствия искажений эмиттанса пучка, что существенно при его дальнейшем использовании.

4. Поскольку ни один из рассмотренных методов (Q_r , FT) не обеспечивает уровня потерь на передней стенке выводного устройства не более 10^{-3} , то для интенсивности пучка свыше 6-8 мА необходима разработка принципиально нового метода вывода частиц. Радикальным решением проблемы было бы также увеличение энергии инжекции в ДЦ-1 до значения порядка 15 МэВ/нуклон.

В заключение авторы выражают свою благодарность за плодотворные обсуждения и ценные предложения по теме сообщения сотрудникам ЛИЯН Д.Л.Новикову, Е.В.Самсонову, А.А.Глазову, Н.Л.Заплатину.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазов А.А. и др. – В кн.: Труды Всесоюзного совещания по ускорителям ионов низких и средних энергий. Киев: Наукова думка, 1982, с.182; ОИЯИ, P9-81-734, Дубна, 1981.
2. Борисов О.Н. и др. – В кн.: Труды Десятого всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Д9-87-105, Дубна, 1987, т.II, с.233.
3. Joho W. – In: Proc. of 11 Int. Conf. on Cycl. Appl., Tokyo, 1986.
4. Chabert A., Prome M. – In: Proc. of the Conf. on Accel. Design and Oper., Berlin, 1983, p.164. Springer-Verlag, 1984.
5. Vorozhtsov S.B., Kalinkina M.B., Saenko V.A. – In: Proc. of the Conf. on Computation of Electr. Fields, Graz, Austria, 1987; ОИЯИ, P9-87-457, Дубна, 1987.
6. Ворожцов С.Б., Калинкина М.Б., Саенко В.А. ОИЯИ, P9-87-671, Дубна, 1987.
7. Ворожцов С.Б., Калинкина М.Б., Саенко В.А. ОИЯИ, P9-88-416, Дубна, 1988.
8. Vorozhtsov S.B. et al. – J. de Physique, 1984, C1, No.1, v.45, p.C1-893; JINR, E9-83-608, Dubna, 1983.
9. Аккуратов В.А. и др. ОИЯИ, P9-84-169, Дубна, 1984.
10. Дмитриевский В.П. и др. ОИЯИ, P9-6733, Дубна, 1972.
11. Дмитриевский В.П. и др. ОИЯИ, Д9-81-280, Дубна, 1981.
12. Tripard G.E., Joho W. – NIM, 1970, 79, p.293.
13. Yamazaki T. et al. – In: Proc. of the 6th Symposium on Acc. Scien. and Tech., 1987, Tokyo, Japan, Ionics, p.274.
14. Baron E. et al. – In: Proc. of 11 Int. Conf. on Cycl. Appl., Tokyo, 1986; GANIL, A.86.06.
15. Vasilenko A.T et al. JINR, E9-8443, Dubna, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 сентября 1988 года.

Ворожцов С.Б. и др.

P9-88-707

Исследование вывода пучка из ДЦ-1
с учетом эффектов пространственного заряда

Рассмотрены методы вывода сильноточного пучка из камеры ДЦ-1 с учетом эффектов пространственного заряда. В условиях 100-процентного однооборотного вывода пучка предельное значение интенсивности ускоренных частиц ограничено действием "продольного" пространственного заряда и составляет 1-1,5 мА. Дальнейшее повышение интенсивности пучка требует разработки принципиально нового метода вывода частиц.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод О.С.Виноградовой

Vorozhtsov S.B. et al.

P9-88-707

Beam Extraction Study for DC-1 Cyclotron
with Space Charge Effects Included

The methods for high intensity beam extraction from a vacuum chamber of DC-1 cyclotron with space charge effects included are considered. Limit value of accelerated particle intensity due to longitudinal space charge effect is about 1-1.5 mA under condition of single-thread beam extraction with 100% efficiency. Development of principally new method of particle extraction is required for further increase of beam intensity.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988