

**объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна**

P9-88-641

**С.Л.Богомолов, Ю.Б.Виноградов, Б.Н.Гикал,
Г.Г.Гульбекян, А.А.Ефремов, Д.И.Калчев,
В.Б.Кутнер, И.В.Колесов, Р.Ц.Оганесян**

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ
АКСИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ ИОНОВ
В ЦИКЛОТРОН У 200**

Направлено в Оргкомитет XI Всесоюзного
совещания по ускорителям заряженных частиц,
Дубна, октябрь 1988 года.

1988

ВВЕДЕНИЕ

Широкое распространение получили системы внешней инжекции в циклотроны^{/1-7/}, которые дали новые качественные возможности многим ускорителям. Это - единственный путь получения в циклотронах ускоренных пучков поляризованных ионов; практически полностью решаются вакуумные проблемы при ускорении отрицательных ионов Н⁻, Д⁻. Ряд преимуществ система внешней инжекции пучков имеет перед внутренним источником для циклотронов тяжелых ионов:

1. Может быть использован ионный источник любого типа /PIG, ECR, FBIS, дуоплазматрон/. Более того, на одном ускорителе могут применяться несколько типов источников, которые в сумме дают возможность получить широкий диапазон ионов, недостижимый на каком-либо одном.

2. Вакуум в камере циклотрона в рабочем режиме может быть улучшен в несколько раз, тем самым уменьшены потери пучка из-за перезарядки на остаточном газе.

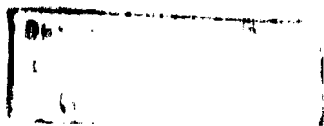
3. Предварительная сепарация пучка в канале внешней инжекции приводит к снижению нагрузки на ВЧ систему, снижению вероятности пробоя с дуантами.

4. Сформированный вне циклотрона пучок обеспечивает высокое качество ускоренного пучка, эффективный вывод и транспортировку по каналам.

5. За счет барьирования и высокоэффективной системы аксиальной инжекции есть возможность увеличить коэффициент использования пучков, генерируемых ионным источником, особенно высокозарядных ионов, которые, как правило, имеют низкую интенсивность.

6. Снижение общих потерь пучка в процессе ускорения ведет к снижению активации ускорителя.

7. Несравненно меньше срабатывают детали в центре циклотрона, так отсутствует бомбардировка мощным пучком попутных ионов.



ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ СИСТЕМЫ АКСИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ ПУЧКА В У-200

Канал внешней инъекции пучка рассчитан на трассировку ионов с $A/Z = 2,8 \div 5$, имеет аксептанс около 1000 мм.м рад с таким расчетом, чтобы была возможность использовать источник ионов любого типа.

В рабочем состоянии магнит циклотрона У-200 находится в насыщенном состоянии, что приводит к довольно сильному рассеянному полю в аксиальном отверстии магнита. Измерения и расчеты показали, что это поле может быть использовано для фокусировки инжектируемого пучка^{/8,9/}.

В качестве регулируемых фокусирующих элементов выбраны линзы /МЛ/ и соленоиды /ФС/ с продольным магнитным полем. Поворот пучка из аксиального канала в медианную плоскость циклотрона с последующим выводом на первую орбиту ускорения осуществляется электростатическим зеркалом - инфлектором, который отличается от других типов инфлекторов /спирального и гиперболического/ простотой конструкции и большим аксептансом. Проведенные расчеты с учетом конкретных условий позволили выбрать геометрию инфлектора^{/8/}, который показал эффективную работу^{/10/}.

Для сохранения траектории движения через инфлектор ионов с разным отношением массы к заряду требуется, чтобы ларморовский радиус ρ в поле B_0 не изменялся

$$\rho = \frac{P_0}{Ze B_0} \cdot \sqrt{\frac{2U_{инж} \cdot A/Z}{e/m_0}} \cdot \frac{1}{B_0},$$

где B_0 - магнитное поле в центре циклотрона, P_0 - импульс иона, Ze и $A m_0$ - заряд и масса иона, $U_{инж}$ - напряжение инъекции.

Обычно максимальное напряжение выбирается равным $0,2 \div 0,3 U_d$ / U_d - амплитуда напряжения на дуантах/, что обусловлено условием центровки орбит на первых радиусах ускорения и типом используемого инфлектора - зеркала. Принимая $U_{инж/макс} = 20$ кВ, получаем следующие параметры для всего диапазона ускоряемых ионов:

$$\begin{aligned} A/Z &= 2,8 \div 5, \\ B_0 &= 19,4 \div 19,8 \text{ кГс}, \\ \rho &= 1,74 \text{ см} - \text{const}, \\ U_{инж} &= 19,6 \div 11,5 \text{ кВ}, \\ B_{\rho} &= 33,8 \div 34,5 \text{ кГс/см}, \\ P_0/Z &= 10,13 \div 10,34 \text{ МэВ/с}. \end{aligned}$$

Схема системы аксиальной инъекции пучка в циклотрон У-200 показана на рис. 1.

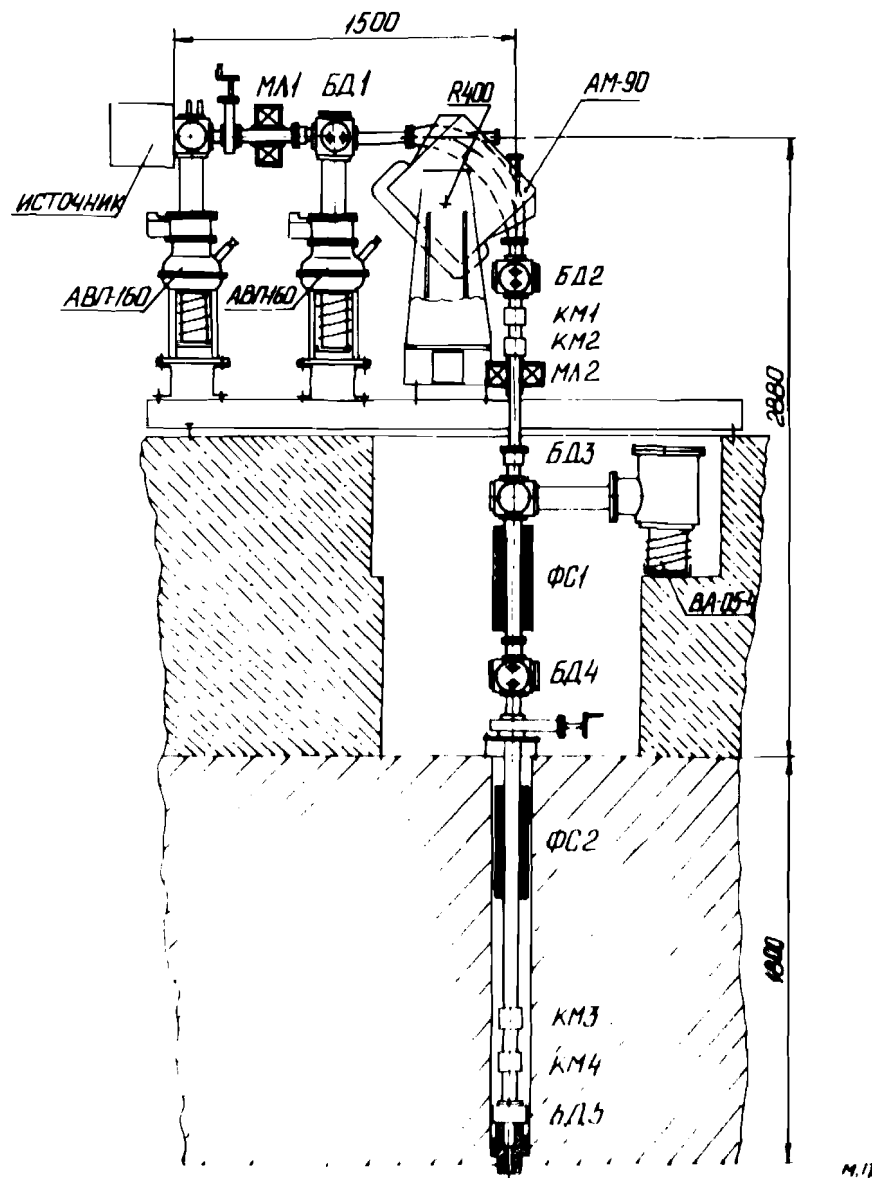


Рис. 1. Схема системы аксиальной инъекции пучка в циклотрон У-200. МЛ - магнитные линзы, ФС - фокусирующие соленоиды, КМ - корректирующие магниты, БД - блоки диагностики.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На этапе запуска системы аксиальной инжекции пучка в циклотрон У-200 использовался высокочастотный источник ионов /11/ как наиболее простой по конструкции, из которого был получен пучок ${}^4\text{He}^{1+}$ с интенсивностью до 100 мкА и эмиттансом 130 мм·мрад. С его помощью произведена наладка системы, получены необходимые стабильности источников питания фокусирующих элементов анализирующего магнита, инфлектора, энергии инжекции. Рабочие режимы элементов транспортировки приведены в табл. 1/10/.

Заметим, что допустимые стабильности получены для системы в отсутствие банчировки.

Вакуумная система аксиальной инжекции позволяет получать давление в канале $7-9 \cdot 10^{-6}$ Тор, при котором теряется не более 10% пучка ${}^4\text{He}^{1+}$ /рис. 2/. Потери более тяжелых ионов не превысят 20% /12/.

Экспериментально измеренная траектория движения пучка через инфлектор хорошо совпала с расчетами /рис. 3/. Хорошо сформированный пучок в центре циклотрона имел небольшие потери /~16%/ при ускорении внутри циклотрона.

После оптимизации режимов работы всех элементов транспортировки пучка получена максимальная эффективность трансмиссии

Рис. 2. Зависимость интенсивности пучка ионов ${}^4\text{He}^{1+}$ на входе в инфлектор от давления в канале инжекции. $U_{\text{инж}} = 15$ кВ.

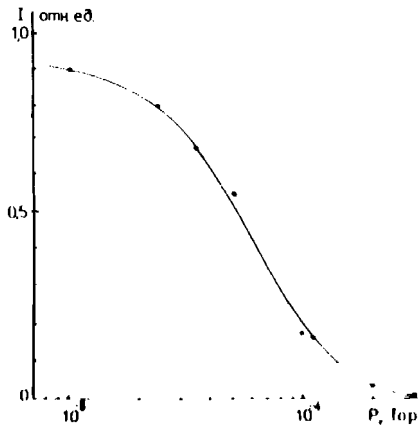


Таблица 1

Рабочий режим Абсолютное значение	$U_{\text{инж}}$ 15,0 кВ	$U_{\text{инф}}$ 12,7 кВ	$I_{\text{мл1}}$ 170 А 6 кВс	$I_{\text{мл2}}$ 130 А 1,7 кВс	$I_{\text{фс1}}$ 190 А 1,1 кВс	$I_{\text{фс2}}$ 450 А 1,28 кВс	$I_{\text{ам-40}}$ 6,94 А 0,68 кВс
Измеренная стабильность	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Допустимая стабильность	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$

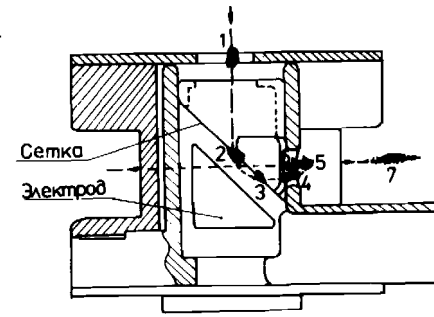


Рис. 3. Траектория движения пучка в центральной области циклотрона. В точках 1-7 даны измеренные профили пучка в плоскости, перпендикулярной его движению.

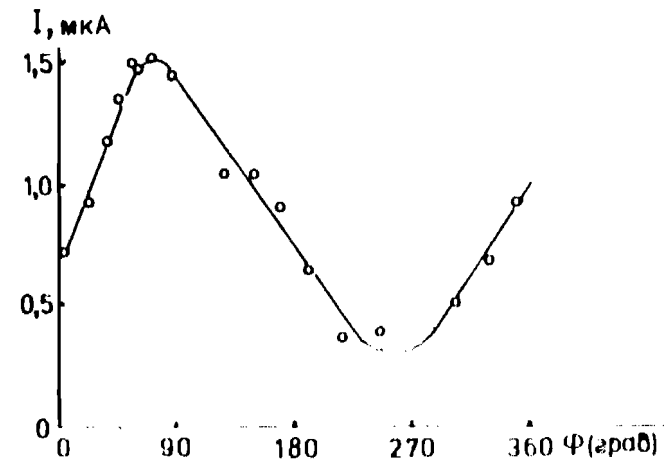
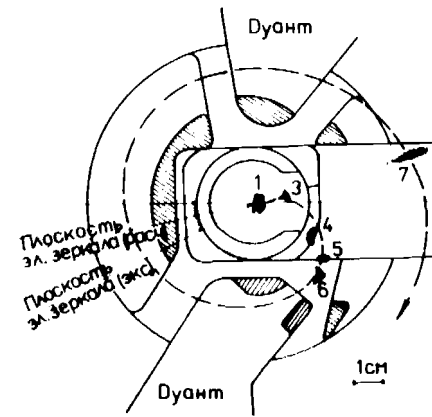


Рис. 4. Зависимость интенсивности ускоренного пучка в циклотроне от фазы ВЧ напряжения на банчере при оптимальной амплитуде.

пучка от сепарирующего магнита до конечного радиуса ускорения 8-10%.

В циклотроне У-200 диапазон ускоряемых фаз составляет около $30-40^{\circ}/13'$. Для увеличения коэффициента захвата был использован двухазорный банчер на первой гармонике ВЧ напряжения, расположенный на расстоянии 3,8 м от инфлектора. В нашем случае получено увеличение интенсивности ускоряемого пучка в два раза /рис. 4/. Эффект банчировки в системе аксиальной инжекции на У-200 требует более детального изучения, в частности, в связи с влиянием пространственного заряда в продольном направлении, который с увеличением тока пучка приводит к уменьшению эффективности банчировки^{13/}.

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА

Для получения интенсивных пучков в системе аксиальной инжекции использован дуоплазматрон, из которого был получен и исследован пучок ${}^4\text{He}^{1+}$ с интенсивностью до 1 мА. Характерной особенностью при транспортировке интенсивных пучков явилось изменение режимов фокусирующих элементов в зависимости от тока пучка, что, по-видимому, связано с влиянием пространственного заряда. Существующими элементами транспортировки удалось трассировать пучок с интенсивностью до 500 мкА без изменения эффективности; при дальнейшем повышении тока инжектируемого пучка падения коэффициента транспортировки избежать не удалось, так как два из четырех фокусирующих элементов достигли предельного режима /рис. 5/.

Теоретически оценки влияния пространственного заряда проводились по уравнениям Капчинского-Владимирского^{13, 14/}

$$X'' + K_x X - \frac{2Q}{X+Y} - \frac{r_x^2}{X^3} = 0, \quad (*)$$

$$Y'' + K_y Y - \frac{2Q}{X+Y} - \frac{r_y^2}{Y^3} = 0.$$

Данные уравнения описывают движение огибающей пучка, не обладающей аксиальной симметрией. Здесь $K_{x,y}$ учитывают внешние фокусирующие поля, Q учитывает собственные поля, $r_{x,y}$ представляет собой эмittance конечной величины Q — переносимая переплетивистской заряженного пучка:

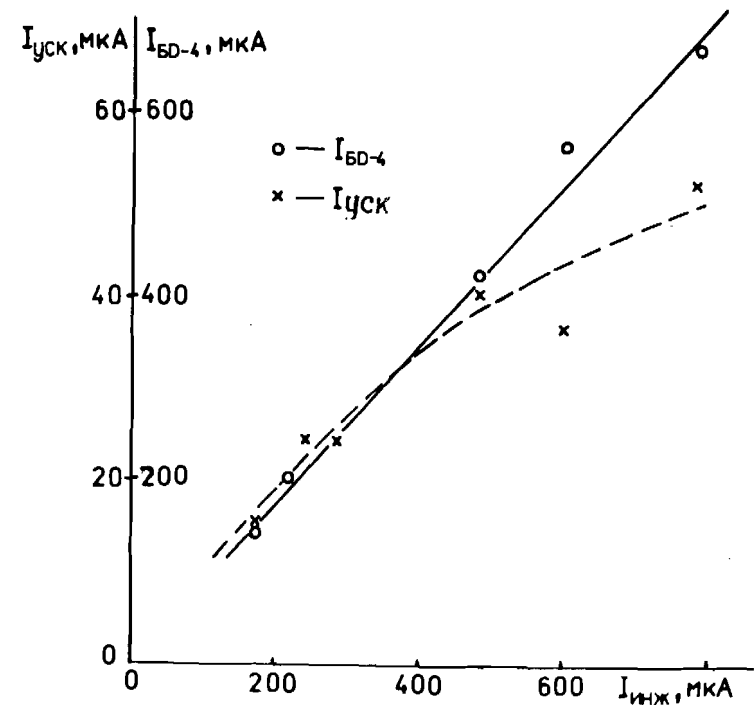


Рис. 5. Зависимость тока ускоренного пучка от тока инжектируемого пучка при оптимальных условиях транспортировки.

$$Q = \frac{I}{U^{3/2}} \cdot \frac{(Am_0)^{1/2}}{4\sqrt{2} \pi \epsilon_0 (Zv)^{1/2}}$$

где I — ток пучка, U — потенциал инжекции.

В программу расчетов вводились коэффициенты $K_{x,y}$ для дрейфа, поворотного магнита и соленоида /см. табл. 2/, также учитывались краевые поля магнита. Решение системы дифференциальных уравнений (*) проводилось методом Рунге-Кутты 4-го порядка.

На рис. 6 представлены огибающие пучков ${}^4\text{He}^{1+}$ с интенсивностями $I_1 = 165 \text{ мкА}$, $I_2 = 235 \text{ мкА}$, $I_3 = 600 \text{ мкА}$, $I_4 = 770 \text{ мкА}$, при этом магнитные поля внешних фокусирующих элементов приведены в табл. 3.

Представленные на рис. 7 результаты показывают удовлетворительное согласие теоретических и экспериментальных данных по влиянию пространственного заряда на коэффициенты транс-

Таблица 2

	K_x	K_y
дрейф	0	0
поворотный магнит	$1/\rho^2$	0
соленоид	$(aB/2P)^2$	$(qB/2P)^2$

миссии инжектируемого пучка. Уравнения КВ в присутствии продольного магнитного поля справедливы для аксиально-симметричных пучков, что в данном случае практически обеспечивает крайняя фокусировка сепарирующего магнита.

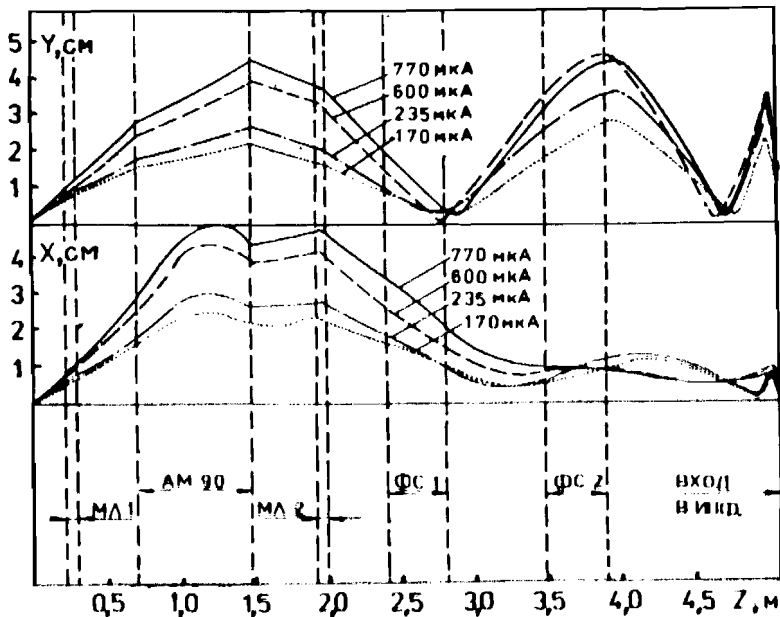


Рис. 6. Осциллирующая пучка при различных интенсивностях.

Таблица 3

$I_{инж.}$ /мкА/	МЛ-1 /кГс/	МЛ-2 /кГс/	ФС-1 /кГс/	ФС-2 /кГс/
165	3,8	2,5	1,2	1,15
235	3,5	2,7	1,15	1,3
600	-3,7	-3,1	0,8	-1,4
770	-3,7	-2,7	1,1	-1,4

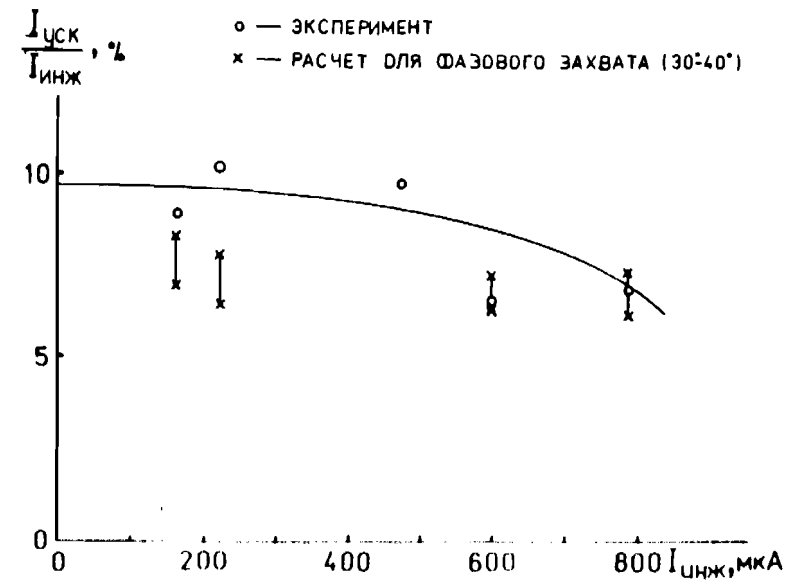


Рис. 7. Зависимость коэффициента трансмиссии пучка от его интенсивности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная система аксиальной инжекции открывает новые возможности для циклотронов ВЯР. Ее ближайшее развитие на циклотроне У 200 с использованием вместо дуошама-трона источника типа РГБ позволит получить эксперимен-

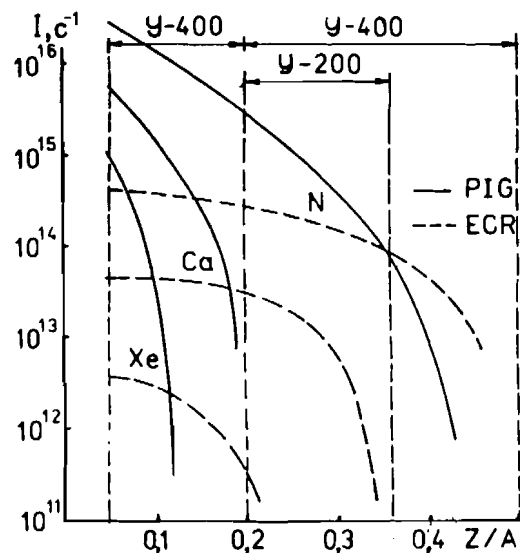


Рис. 8. Возможности источников ECR и PIG по интенсивностям пучков для разных Z/A.

тельную информацию об эффективности транспортировки пучков тяжелых ионов при интенсивности из источника свыше 10^{15} с^{-1} .

Эти результаты позволяют ответить на вопрос о том, насколько целесообразно создание системы аксиальной инжекции с источником типа PIG на циклотроне У-400. Оценки показывают, что если при интенсивности инжектиру-

емого пучка $5 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ суммарная эффективность составит даже 1-3%, то ее создание на У-400 оправдано, так как использование внешнего источника позволит за счет улучшения вакуума с $1 \cdot 10^{-6}$ Тор до $3 \cdot 10^{-7}$ Тор снизить потери пучка из-за перезарядки с 30-70% до 10% [18], а также улучшить эксплуатационные характеристики циклотрона.

Использование аксиальной инжекции с источником типа ECR на циклотроне У-400М при работе его в автономном режиме позволит в определенном диапазоне получать пучки ионов, которые предполагается получать в циклотронном комплексе У-400 + У-400М. При существующем уровне развития источников ECR возможно получение на У-400М в автономном режиме пучков ионов от $^{16}\text{O}^{8+}$ до $^{132}\text{Xe}^{26+}$ ($A/Z = 2-5$) с энергиями 120-20 МэВ/нуклон и интенсивностями $3 \cdot 10^{10} - 10^9 \text{ с}^{-1}$ [рис. 8/ [17, 18]].

ЛИТЕРАТУРА

1. P.J.Clark, C.H.Lynch. In: Proc. 11th Intern. Conf. on Cycl. and their Appl. Tokyo, October 13-17, 1986, p.499.
2. Bol J.L. et al. IHE Trans. on Nucl. Sci., 1985, N5-32, No. 5, p.1817.
3. Baron L., Bex L., Bourdarel M.P. GANIL ARG 03, Caen, 1986.
4. Albrand S. et al. In: Proc. 11th Intern. Conf. on Cycl. and their Appl., Tokyo, October 13-17, 1986, p.191.

5. Bechtold, L.Friedrich, F.Schulz. In: Proc. 10th Intern. Conf. on Cycl. and their Appl. Michigan April 30 - May 3, 1984, p.118.
6. Brantigam W. et al. In: Proc. 10th Intern. Conf. on Cycl. and their Appl. Michigan, April 30 - May 5, 1984, p.122.
7. van Asselt W.K. et al. In: Proc. 10th Intern. Conf. on Cycl. and their Appl. Michigan, April 30 - May 5, 1984, p.177.
8. Виноградов Ю.Б. и др. ОИЯИ, Р9-87-869, Дубна, 1987.
9. Бехтерев В.В. и др. ОИЯИ, 9-87-379, Дубна, 1987.
10. Виноградов Ю.Б. и др. ОИЯИ, Р9-88-20, Дубна, 1988.
11. Романов В.А., Сербилов А.Н. - ПТЭ, 1963, №1, с.27.
12. Lieuvin M., Balmont J.L., Bajard M. In: Proc. 7th Inzrtn. Conf.on Cycl.and their Appl.Birkhäuser, Basel, 1975, p.614.
13. Гикал Б.Н. и др. ОИЯИ, 9-83-311, Дубна, 1983.
14. Капчинский И.М. Движение частиц в линейных резонансных ускорителях. М.: Атомиздат, 1966.
15. Лоусон Д. Физика пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1980.
16. Гульбемян Г.Г., Иваненко А.И., Гикал Б.Н. ОИЯИ, Р9-83-451, Дубна, 1983.
17. Geller R. Grenoble, Eleventh Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, 1986, Tokyo, Japan.
18. Богомолов С.Л. и др. В кн.: Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1983, т.1, с.112.

Рукопись поступила в редакцию издательского отдела
25 августа 1988 года.

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Богомолов С.Л. и др.

P9-88-641

Исследование системы аксиальной инжекции ионов в циклотрон У-200

Приведены результаты запуска системы аксиальной инжекции ионов в циклотрон У-200. Эффективность транспортировки пучка от сепарирующего магнита до конечного радиуса ускорения составила 8-10% без банчировки пучка. Использование в системе банчера позволило увеличить интенсивность ускоренного пучка в два раза. Рассмотрено влияние пространственного заряда в канале внешней инжекции при транспортировке пучка с интенсивностью до 1 мА /для $A/Z = 4$ /.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод О.С.Виноградовой

Bogomolov S.L. et al.

P9-88-641

Investigation of Ion Axial Injection System for the U-200 Cyclotron

The results of the startup of ion axial injection system for the U-200 cyclotron are presented. Efficiency of beam transmission from separating magnet to final accelerating radius is 8-10% without beam bunching. Utilization of bunching system permitted to increase the accelerated beam intensity by a factor of 2. The influence of space charge in the transport system with the beam intensity up to 1 mA (for $A/Z = 4$) is considered.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988

ВВЕДЕНИЕ

Широкое распространение получили системы внешней инжекции в циклотроны /1-7/, которые дали новые качественные возможности многим ускорителям. Это - единственный путь получения в циклотронах ускоренных пучков поляризованных ионов; практически полностью решаются вакуумные проблемы при ускорении отрицательных ионов H^- , D^- . Ряд преимуществ система внешней инжекции пучков имеет перед внутренним источником для циклотронов тяжелых ионов:

1. Может быть использован ионный источник любого типа /PIG, ECR, EBIS, дуоплазмотрон/. Более того, на одном ускорителе могут применяться несколько типов источников, которые в сумме дают возможность получить широкий диапазон ионов, недостижимый на каком-либо одном.

2. Вакуум в камере циклотрона в рабочем режиме может быть улучшен в несколько раз, тем самым уменьшены потери пучка из-за перезарядки на остаточном газе.

3. Предварительная сепарация пучка в канале внешней инжекции приводит к снижению нагрузки на ВЧ систему, снижению вероятности пробоя с дуантов.

4. Сформированный вне циклотрона пучок обеспечивает высокое качество ускоренного пучка, эффективный вывод и трассировку по каналам.

5. За счет банчировки и высокоэффективной системы аксиальной инжекции есть возможность увеличить коэффициент использования пучков, генерируемых ионным источником, особенно высокозарядных ионов, которые, как правило, имеют низкую интенсивность.

6. Снижение общих потерь пучка в процессе ускорения ведет к снижению активации узлов циклотрона.

7. Несравненно меньше срабатывают детали в центре циклотрона, т.к. отсутствует бомбардировка мощным пучком попутных ионов.

ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ СИСТЕМЫ АКСИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ ПУЧКА В У-200

Канал внешней инъекции пучка рассчитан на трассировку ионов с $A/Z = 2,8 \div 5$, имеет аксептанс около 1000 мм.м рад с таким расчетом, чтобы была возможность использовать источник ионов любого типа.

В рабочем состоянии магнит циклотрона У-200 находится в насыщенном состоянии, что приводит к довольно сильному рассеянному полю в аксиальном отверстии магнита. Измерения и расчеты показали, что это поле может быть использовано для фокусировки инжектируемого пучка^{/8,9/}.

В качестве регулируемых фокусирующих элементов выбраны линзы /МЛ/ и соленоиды /ФС/ с продольным магнитным полем. Поворот пучка из аксиального канала в медианную плоскость циклотрона с последующим выводом на первую орбиту ускорения осуществляется электростатическим зеркалом - инфлектором, который отличается от других типов инфлекторов /спирального и гиперболического/ простотой конструкции и большим аксептансом. Проведенные расчеты с учетом конкретных условий позволили выбрать геометрию инфлектора^{/8/}, который показал эффективную работу^{/10/}.

Для сохранения траектории движения через инфлектор ионов с разным отношением массы к заряду требуется, чтобы ларморовский радиус ρ в поле B_0 не изменялся

$$\rho = \frac{P_0}{Ze B_0} = \sqrt{\frac{2U_{\text{инж}} \cdot A/Z}{e/m_0}} \cdot \frac{1}{B_0},$$

где B_0 - магнитное поле в центре циклотрона, P_0 - импульс иона, Ze и $A m_0$ - заряд и масса иона, $U_{\text{инж}}$ - напряжение инъекции.

Обычно максимальное напряжение выбирается равным $0,2 \div 0,3 U_d$ / U_d - амплитуда напряжения на дуантах/, что обусловлено условием центровки орбит на первых радиусах ускорения и типом используемого инфлектора - зеркала. Принимая $U_{\text{инж}/\text{макс}} = 20 \text{ кВ}$, получаем следующие параметры для всего диапазона ускоряемых ионов:

$$\begin{aligned} A/Z &= 2,8 \div 5, \\ B_0 &= 19,4 \div 19,8 \text{ кГс}, \\ \rho &= 1,74 \text{ см} = \text{const}, \\ U_{\text{инж}} &= 19,6 \div 11,5 \text{ кВ}, \\ B_0 \rho &= 33,8 \div 34,5 \text{ кГс} \cdot \text{см}, \\ P_0/Z &= 10,13 \div 10,34 \text{ МэВ/с}. \end{aligned}$$

Схема системы аксиальной инъекции пучка в циклотрон У-200 показана на рис. 1.

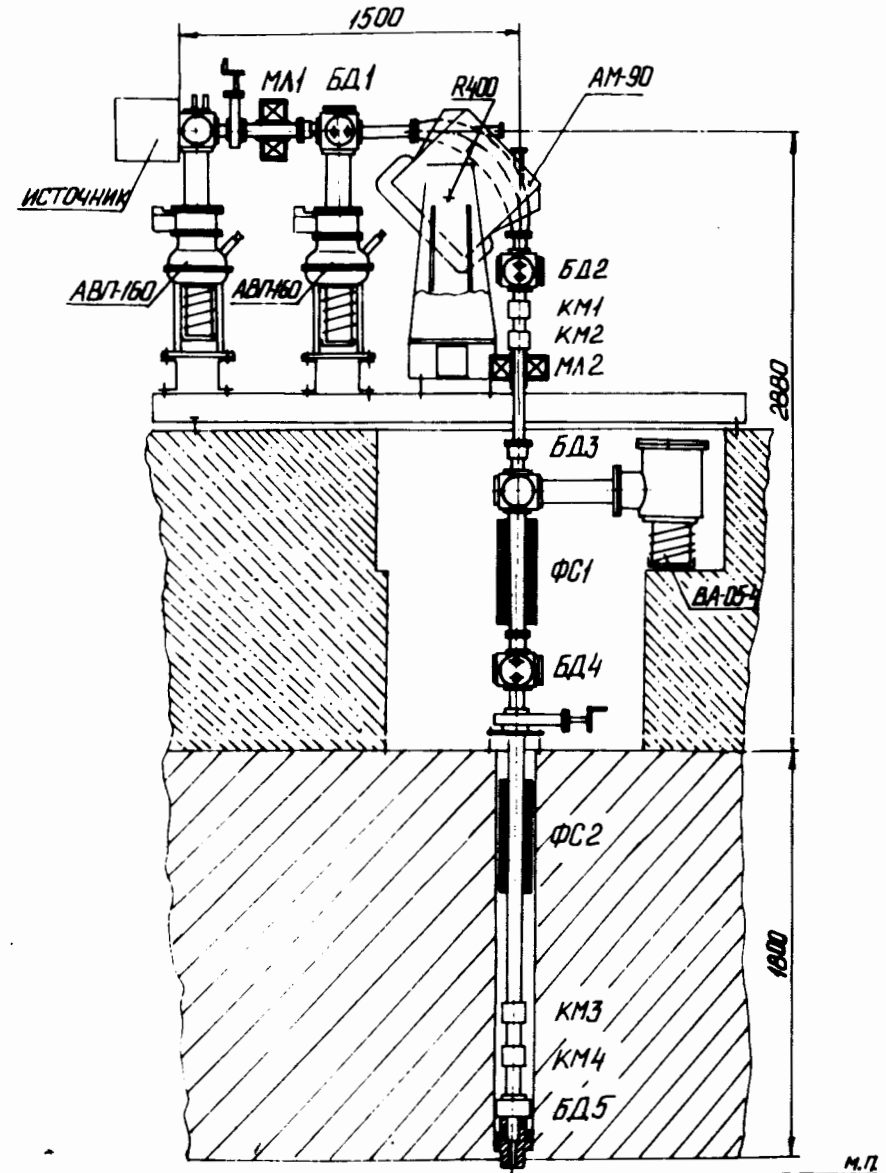


Рис. 1. Схема системы аксиальной инъекции пучка в циклотрон У-200. МЛ - магнитные линзы, ФС - фокусирующие соленоиды, КМ - корректирующие магниты, БД - блоки диагностики.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На этапе запуска системы аксиальной инъекции пучка в циклотрон У-200 использовался высокочастотный источник ионов ¹¹/ как наиболее простой по конструкции, из которого был получен пучок ⁴He¹⁺ с интенсивностью до 100 мкА и эмиттансом 130 мм·мрад. С его помощью произведена наладка системы, получены необходимые стабильности источников питания фокусирующих элементов анализирующего магнита, инфлектора, энергии инъекции. Рабочие режимы элементов транспортировки приведены в табл. 1^{/10/}.

Заметим, что допустимые стабильности получены для системы в отсутствие банчировки.

Вакуумная система аксиальной инъекции позволяет получать давление в канале $7-9 \cdot 10^{-6}$ Тор, при котором теряется не более 10% пучка ⁴He¹⁺ /рис. 2/. Потери более тяжелых ионов не превысят 20% ^{/12/}.

Экспериментально измеренная траектория движения пучка через инфлектор хорошо совпала с расчетами /рис. 3/. Хорошо сформированный пучок в центре циклотрона имел небольшие потери / ~16% / при ускорении внутри циклотрона.

После оптимизации режимов работы всех элементов транспортировки пучка получена максимальная эффективность трансмиссии

Рис. 2. Зависимость интенсивности пучка ионов ⁴He¹⁺ на входе в инфлектор от давления в канале инъекции. $U_{инж} = 15$ кВ.

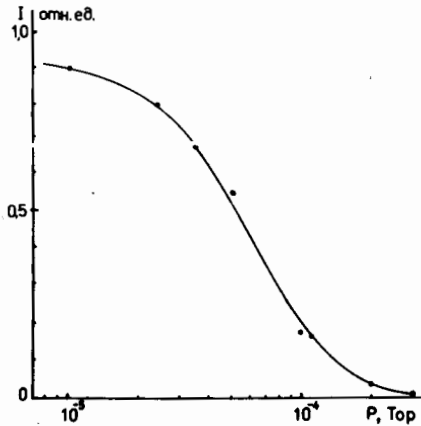


Таблица 1

Рабочий режим	$U_{инж}$	$U_{инф}$	$I_{мл1}$	$I_{мл2}$	$I_{фс1}$	$I_{фс2}$	$I_{ам-90}$
Абсолютное значение	15,0 кВ	12,7 кВ	370 А 4 кГц	330 А 3,7 кГц	390 А 1,1 кГц	450 А 1,28 кГц	6,94 А 0,68 кГц
Измеренная нестабильность	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Допустимая нестабильность	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$

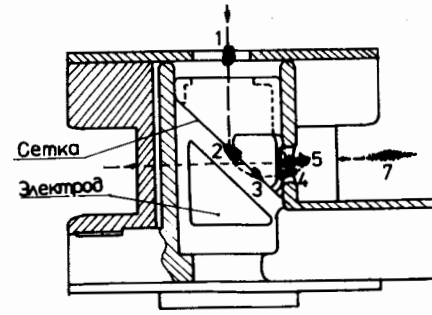


Рис. 3. Траектория движения пучка в центральной области циклотрона. В точках 1-7 даны измеренные профили пучка в плоскости, перпендикулярной его движению.

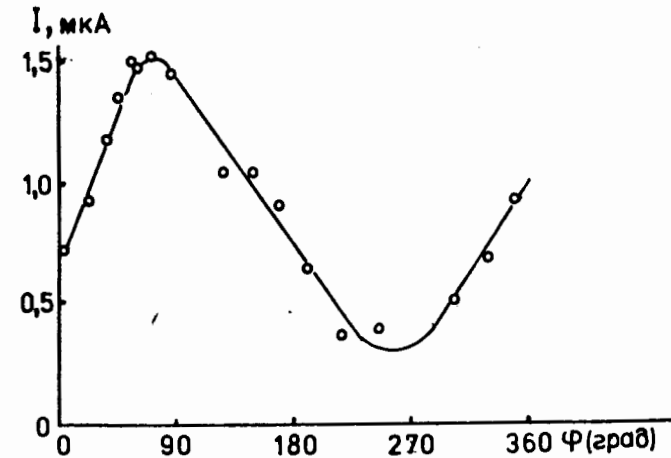
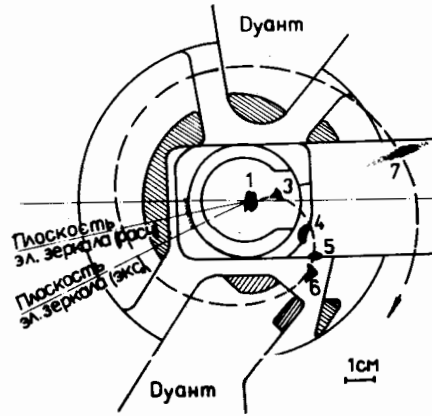


Рис. 4. Зависимость интенсивности ускоренного пучка в циклотроне от фазы ВЧ-напряжения на банчере при оптимальной амплитуде.

пучка от сепарирующего магнита до конечного радиуса ускорения 8-10%.

В циклотроне У-200 диапазон ускоряемых фаз составляет около 30-40°^{13/}. Для увеличения коэффициента захвата был использован двухззорный банчер на первой гармонике ВЧ напряжения, расположенный на расстоянии 3,8 м от инфлектора. В нашем случае получено увеличение интенсивности ускоряемого пучка в два раза /рис. 4/. Эффект банчировки в системе аксиальной инжекции на У-200 требует более детального изучения, в частности, в связи с влиянием пространственного заряда в продольном направлении, который с увеличением тока пучка приводит к уменьшению эффективности банчировки^{13/}.

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА

Для получения интенсивных пучков в системе аксиальной инжекции использован дуоплазматрон, из которого был получен и исследован пучок ${}^4\text{He}^{1+}$ с интенсивностью до 1 мА. Характерной особенностью при транспортировке интенсивных пучков явилось изменение режимов фокусирующих элементов в зависимости от тока пучка, что, по-видимому, связано с влиянием пространственного заряда. Существующими элементами транспортировки удалось трассировать пучок с интенсивностью до 500 мкА без изменения эффективности; при дальнейшем повышении тока инжектируемого пучка падения коэффициента транспортировки избежать не удалось, так как два из четырех фокусирующих элементов достигли предельного режима /рис. 5/.

Теоретически оценки влияния пространственного заряда проводились по уравнениям Капчинского-Владимирского^{13,14/}

$$X'' + K_x X - \frac{2Q}{X+Y} - \frac{\epsilon_x^2}{X^3} = 0, \quad (*)$$

$$Y'' + K_y Y - \frac{2Q}{X+Y} - \frac{\epsilon_y^2}{Y^3} = 0.$$

Данные уравнения описывают движение огибающей пучка, не обладающего аксиальной симметрией. Здесь $K_{x,y}$ учитывают внешние фокусирующие поля, Q учитывает собственные поля, $\epsilon_{x,y}$ представляет собой эмиттанс конечной величины: Q - перванс нерелятивистского заряженного пучка:

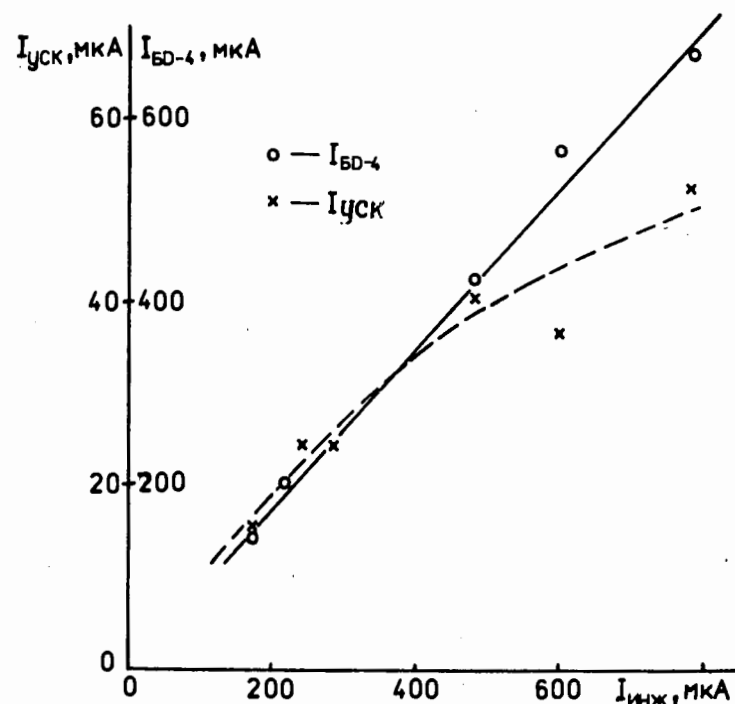


Рис. 5. Зависимость тока ускоренного пучка от тока инжектируемого пучка при оптимальных условиях транспортировки.

$$Q = \frac{I}{U^{3/2}} \cdot \frac{(Am_0)^{1/2}}{4\sqrt{2} \pi \epsilon_0 (Ze)^{1/2}},$$

где I - ток пучка, U - потенциал инжекции.

В программу расчетов вводились коэффициенты $K_{x,y}$ для дрейфа, поворотного магнита и соленоида /см. табл.2/, также учитывались краевые поля магнита. Решение системы дифференциальных уравнений (*), проводилось методом Рунге-Кутты 4-го порядка.

На рис. 6 представлены огибающие пучков ${}^4\text{He}^{1+}$ с интенсивностями $I_1 = 165 \text{ мкА}$, $I_2 = 235 \text{ мкА}$, $I_3 = 600 \text{ мкА}$, $I_4 = 770 \text{ мкА}$, при этом магнитные поля внешних фокусирующих элементов приведены в табл. 3.

Представленные на рис. 7 результаты показывают удовлетворительное согласие теоретических и экспериментальных данных по влиянию пространственного заряда на коэффициенты транс-

Таблица 2

	K_x	K_y
дрейф	0	0
поворотный магнит	$1/\rho^2$	0
соленоид	$(aB/2P)^2$	$(qB/2P)^2$

миссии инжектируемого пучка. Уравнения КВ в присутствии продольного магнитного поля справедливы для аксиально-симметричных пучков, что в данном случае практически обеспечивает крайевая фокусировка сепарирующего магнита.

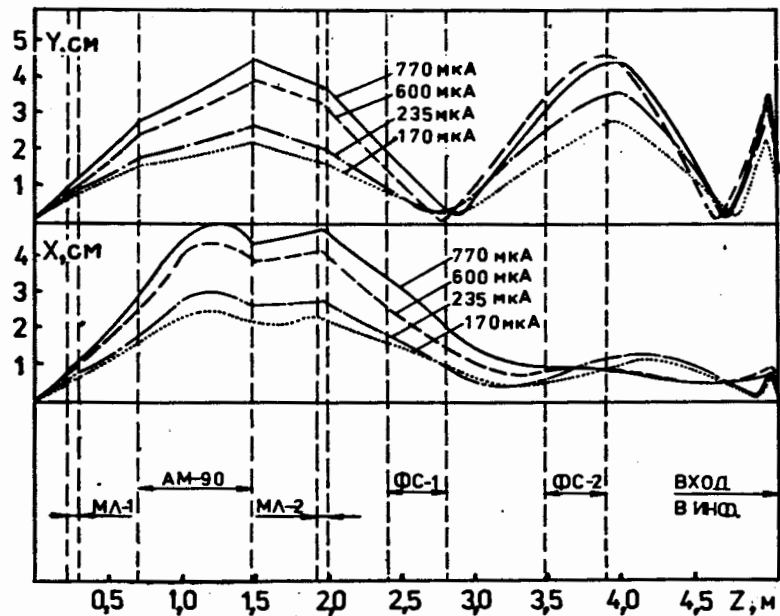


Рис. 6. Огибающие пучка при различных интенсивностях.

Таблица 3

$I_{инж.}$ /мкА/	МЛ-1 /кГс/	МЛ-2 /кГс/	ФС-1 /кГс/	ФС-2 /кГс/
165	3,8	2,5	1,2	1,15
235	3,5	2,7	1,15	1,3
600	-3,7	-3,1	0,8	-1,4
770	-3,7	-2,7	1,1	-1,4

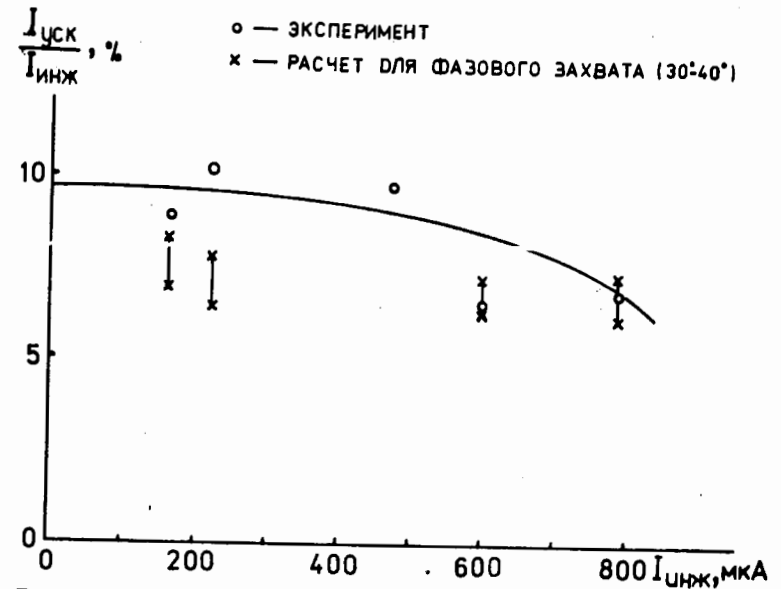


Рис. 7. Зависимость коэффициента трансмиссии пучка от его интенсивности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная система аксиальной инжекции открывает новые возможности для циклотронов ЛЯР. Ее ближайшее развитие на циклотроне У-200 с использованием вместо дуоплазматрона источника типа РІГ позволит получить эксперимен-

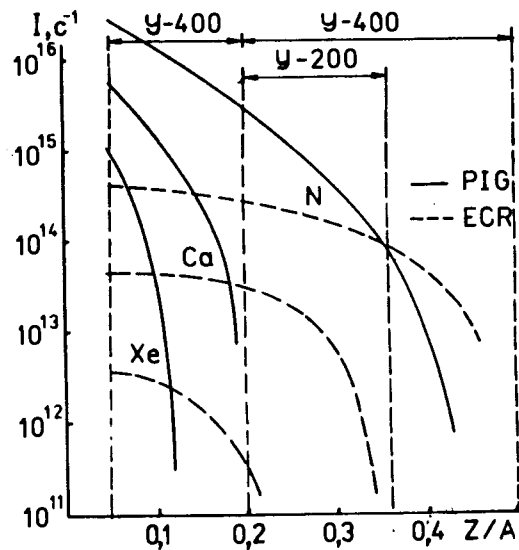


Рис. 8. Возможности источников ECR и PIG по интенсивностям пучков для разных Z/A .

тальную информацию об эффективности транспортировки пучков тяжелых ионов при интенсивности из источника свыше 10^{15} c^{-1} .

Эти результаты позволяют ответить на вопрос о том, насколько целесообразно создание системы аксиальной инжекции с источником типа PIG на циклотроне У-400. Оценки показывают, что если при интенсивности инжектиру-

емого пучка $5 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$ суммарная эффективность составит даже 1-3%, то ее создание на У-400 оправдано, так как использование внешнего источника позволит за счет улучшения вакуума с $1 \cdot 10^{-6}$ Тор до $3 \cdot 10^{-7}$ Тор снизить потери пучка из-за перезарядки с 30-70% до 10%^{17,18}, а также улучшить эксплуатационные характеристики циклотрона.

Использование аксиальной инжекции с источником типа ECR на циклотроне У-400М при работе его в автономном режиме позволит в определенном диапазоне получать пучки ионов, которые предполагается получать в циклотронном комплексе У-400 + У-400М. При существующем уровне развития источников ECR возможно получение на У-400М в автономном режиме пучков ионов от $^{16}\text{O}^{8+}$ до $^{132}\text{Xe}^{26+}$ ($A/Z = 2 \div 5$) с энергиями 120-20 МэВ/нуклон и интенсивностями $3 \cdot 10^{10} - 10^9 \text{ c}^{-1}$ /рис. 8/ ^{17,18}.

ЛИТЕРАТУРА

1. P.J.Clark, C.M.Lyneis In: Proc. 11th Intern. Conf. on Cycl. and their Appl. Tokyo, October 13-17, 1986, p.499.
2. Bol J.L. et al. IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1985, NS-32, No. 5, p.1817.
3. Baron E., Vex L., Bourgarel M.P. GANIL A86-03, Gaen, 1986.
4. Albrand S. et al. In: Proc. 11th Intern. Conf. on Cycl. and their Appl., Tokyo, October 13-17, 1986, p.191.

5. Bechtold, L.Friedrich, F.Schulz. In: Proc. 10th Intern. Conf. on Cycl. and their Appl. Michigan April 30 - May 3, 1984, p.118.
6. Bräntigam W. et al. In: Proc. 10th Intern. Conf. on Cycl. and their Appl. Michigan, April 30 - May 5, 1984, p.122.
7. van Asselt W.K. et al. In: Proc. 10th Intern. Conf. on Cycl. and their Appl. Michigan, April 30 - May 5, 1984, p.177.
8. Виноградов Ю.Б. и др. ОИЯИ, P9-87-869, Дубна, 1987.
9. Бехтерев В.В. и др. ОИЯИ, 9-87-379, Дубна, 1987.
10. Виноградов Ю.Б. и др. ОИЯИ, P9-88-20, Дубна, 1988.
11. Романов В.А., Сербиллов А.Н. - ПТЭ, 1963, №1, с.27.
12. Lieuvain M., Balmont J.L., Bajard M. In: Proc. 7th Inzrtn. Conf. on Cycl. and their Appl. Birkhäuser, Basel, 1975, p.614.
13. Гикал Б.Н. и др. ОИЯИ, 9-83-311, Дубна, 1983.
14. Капчинский И.М. Движение частиц в линейных резонансных ускорителях. М.: Атомиздат, 1966.
15. Лоусон Д. Физика пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1980.
16. Гульбеян Г.Г., Иваненко А.И., Гикал Б.Н. ОИЯИ, P9-83-451, Дубна, 1983.
17. Geller R. Grenoble, Eleventh Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, 1986, Tokyo, Japan.
18. Богомолов С.Л. и др. В кн.: Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1983, т.1, с.ii2.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 августа 1988 года.

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Богомолов С.Л. и др.

P9-88-641

Исследование системы аксиальной инжекции ионов в циклотрон У-200

Приведены результаты запуска системы аксиальной инжекции ионов в циклотрон У-200. Эффективность транспортировки пучка от сепарирующего магнита до конечного радиуса ускорения составила 8-10% без банчировки пучка. Использование в системе банчера позволило увеличить интенсивность ускоренного пучка в два раза. Рассмотрено влияние пространственного заряда в канале внешней инжекции при транспортировке пучка с интенсивностью до 1 мА /для $A/Z = 4$ /.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод О.С.Виноградовой

Bogomolov S.L. et al.

P9-88-641

Investigation of Ion Axial Injection System for the U-200 Cyclotron

The results of the startup of ion axial injection system for the U-200 cyclotron are presented. Efficiency of beam transmission from separating magnet to final accelerating radius is 8-10% without beam bunching. Utilization of bunching system permitted to increase the accelerated beam intensity by a factor of 2. The influence of space charge in the transport system with the beam intensity up to 1 mA (for $A/Z = 4$) is considered.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988