

**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

B-493

P9-88-20

**Ю.Б.Виноградов, Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбемян,  
А.А.Ефремов, Д.И.Калчев, В.Б.Кутнер**

**ТРАНСПОРТИРОВКА ПУЧКА ИОНОВ  ${}^4\text{He}^{1+}$   
В СИСТЕМЕ АКСИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ  
ЦИКЛОТРОНА У-200**

**1988**

На этапе запуска системы аксиальной инжекции пучка из внешнего источника ионов в циклотрон У-200 (рис. 1) <sup>1/1</sup> использовался высокочастотный источник ионов <sup>2/2</sup>, из которого был получен пучок <sup>4</sup>He <sup>1+</sup> с энергией 20 кВ, с интенсивностью до 100 мкА и эмиттансом 130 мм мрад.

Рабочий режим работы высокочастотной системы циклотрона — импульсный со скважностью  $2 \pm 6$  <sup>3/3</sup>. Внешний источник работал в непрерывном режиме, поэтому средний ток ускоряемых ионов был обратно пропорционален скважности ВЧ-системы циклотронов (рис. 2). Эффективность транспортировки пучка такой системы оценивалась по току в импульсе.

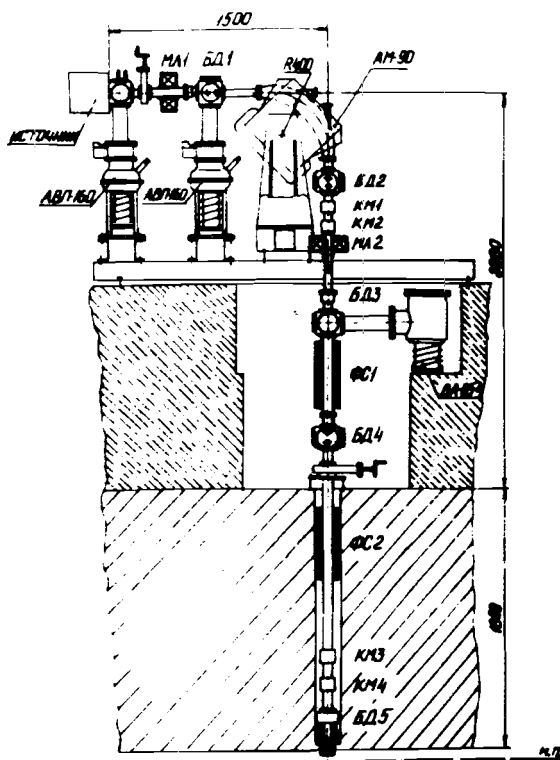


Рис. 1. Система аксиальной инжекции ионов в циклотрон У-200.

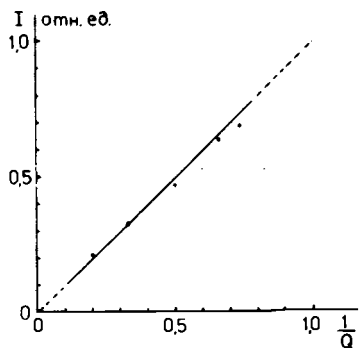


Рис. 2. Зависимость тока пучка ускоренных ионов на конечном радиусе циклотрона от скважности ВЧ-системы Q.

## ЭЛЕМЕНТЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ

Фокусировка пучка в процессе транспортировки производилась с помощью бронированных линз и соленоидов (МЛ-1, МЛ-2, ФС-1, ФС-2). В поворотном магните АМ-90 происходила сепарация пучка по зарядам. Из вертикального канала в медианную плоскость перевод пучка осуществлялся с помощью инфлектора — электростатического зеркала. Было изучено влияние нестабильностей питания элементов системы внешней инжекции на процесс транспортировки и ускорения пучка. На рис. 3 представлены зависимости тока пучка на конечном радиусе циклотрона от токов питания магнитных линз, анализирующего магнита, напряжения инфлектора и энергии инжекции ионов. Исходя из этих зависимостей определены допустимые нестабильности источников питания, которые даны в табл. 1. Приведенные параметры соответствуют оптимальной транспортировке и ускорению пучка в циклотроне.

Таблица 1

Рабочий режим	$U_{инж}$	$U_{инф}$	$I_{МЛ-1}$	$I_{МЛ-2}$	$I_{ФС-1}$	$I_{ФС-2}$	$I_{АМ-90}$
Абсолютное значение	15,0 кВ	12,7 кВ	370 А	330 А	390 А	450 А	6,94 А
Измеренная нестабильность	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Допустимая нестабильность	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$

Заметим, что допустимые стабильности получены для системы в отсутствие банчировки. Для эффективной работы банчера, возможно, потребуется лучшая стабильность напряжения инжекции.

## ДВИЖЕНИЕ ПУЧКА ПО КАНАЛУ АКСИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ

Выбор напряжения инжекции 15 кВ для пучка ионов с  $A/Z = 4$  сделан расчетным путем, исходя из условий эффективной транспортировки ионов, центровки и качества пучка на первых оборотах в циклотроне.

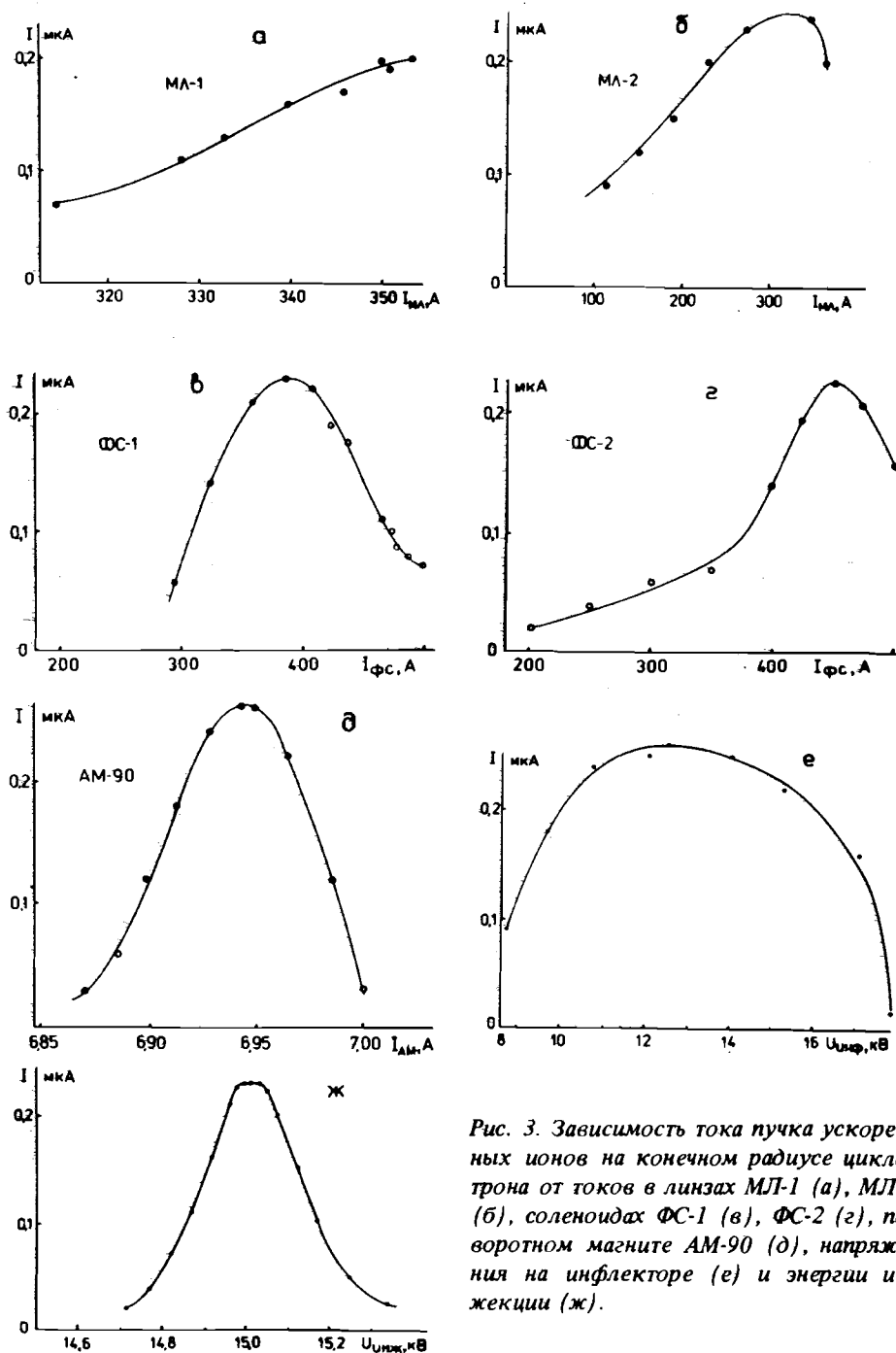


Рис. 3. Зависимость тока пучка ускоренных ионов на конечном радиусе циклотрона от токов в линзах МЛ-1 (а), МЛ-2 (б), соленоидах ФС-1 (в), ФС-2 (з), поворотном магните АМ-90 (д), напряжения на инфлекторе (е) и энергии инжекции (ж).

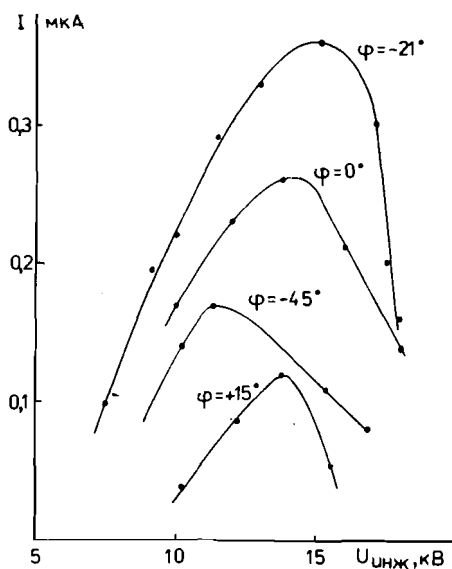


Рис. 4. Зависимость тока пучка ускоренных ионов на конечном радиусе циклотрона от напряжения инъекции при разных углах поворота зеркала —  $\phi$  ( $\phi=0$  — расчетное значение угла поворота).

Энергия инъекции в заданной системе определяет режим работы всех элементов транспортировки пучка и прежде всего инфлектора, в котором для максимального захвата пучка в процессе ускорения необходимо регулировать не только напряжение на электроде, но и поворот зеркала вокруг аксиальной оси, таким образом, чтобы пучок попал в щель пулера и был сцентрирован на первом обороте. На

рис. 4 показана зависимость тока пучка ионов на конечном радиусе циклотрона при оптимальных условиях трассировки и постоянном токе инжектируемого пучка от напряжения инъекции. Для каждого положения зеркала по углу поворота существует напряжение инъекции, при котором ток ускоренного пучка максимален (рис. 5, 6). Оптимальное положение зеркала отличается от расчетного на  $20^\circ$ , ему соответствует  $U_{инж} = 15$  кВ. Профиль пучка и траектория его движения через инфлектор были сняты с помощью токочувствительной бумаги. На рис. 7 они приводятся в сравнении с расчетом. Токи пучка ионов при движении по каналу аксиальной инъекции, а также в процессе ускорения даны в табл. 2.

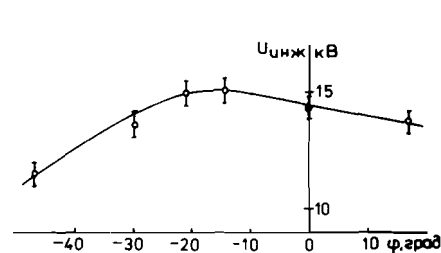


Рис. 5. Оптимальное значение напряжения инъекции в зависимости от угла поворота зеркала.

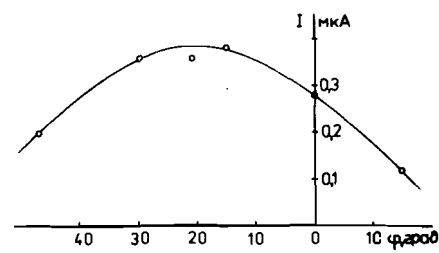


Рис. 6. Зависимость тока ускоренного пучка на конечном радиусе циклотрона от угла поворота зеркала при оптимальном напряжении инъекции.

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

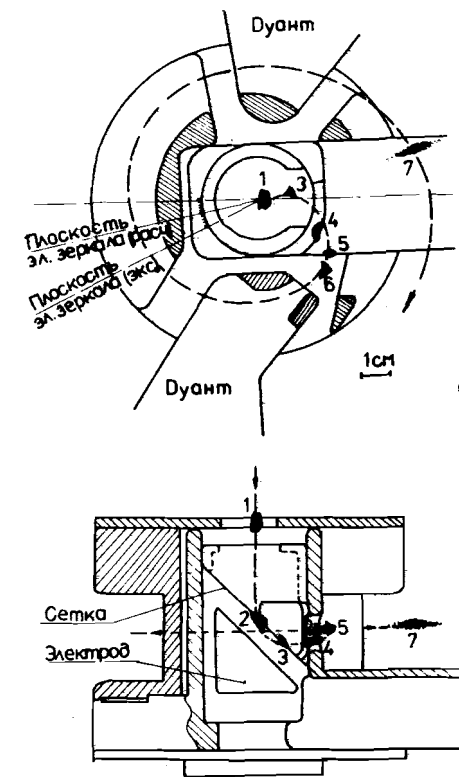


Таблица 2

	I, мкА
БД-1	23
БД-2	20
БД-4	18
R = 20 см	1,9
R = 80 см	1,6

БД- блок диагностики, R — радиус ускорения.

## ВАКУУМНЫЕ ПОТЕРИ

Длина ионпровода в системе аксиальной инъекции составляет 6 м. Один вакуумный насос откачивает непосредственно ионный источник, два других установлены на блоках диагностики БД-1 и БД-3. Нижняя часть канала откачивается через отверстие в магнитной пробке основными насосами циклотрона. Такая система откачки позволила получить вакуум в ионпроводе  $7 \div 9 \cdot 10^{-6}$  Торр.

Зависимость тока пучка ионов  ${}^4\text{He}^{1+}$  на входе в инфлектор от вакуума в канале внешней инъекции (рис. 8) показывает, что в данном случае из-за перезарядки на остаточном газе теряется не более 10% пучка.

При энергиях инъекции ионов  ${}^4\text{He}^{1+}$  около 15 кэВ при столкновении с атомами остаточного газа доминирует процесс захвата электрона: переход  ${}^4\text{He}^{1+} \rightarrow {}^4\text{He}^{0/4/}$ . Для экспериментального измерения сечения перезарядки ионов  ${}^4\text{He}^{1+}$  были проведены измерения тока пучка в БД-2 и БД-4 в зависимости от давления в ионпроводе. Измерение давления производилось в блоке диагностики БД-3. Насос, при-

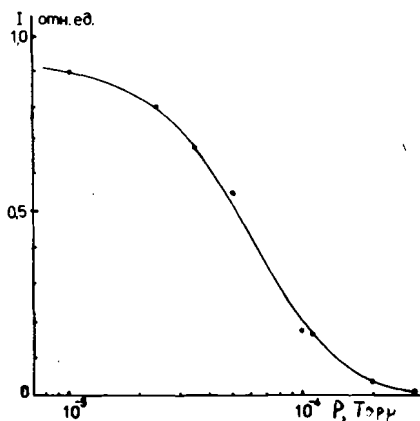


Рис. 8. Зависимость тока пучка ионов  $^4\text{He}^{1+}$  на входе в инфлектор от давления в ионопроводе.  $U_{\text{инж}} = 15$  кВ.

стыкованный к этому блоку, был закрыт, а давление изменялось за счет подачи газа в районе первого блока диагностики. На рис. 9 приведены зависимости токов пучка  $^4\text{He}^{1+}$  в БД-2 и БД-4 от давления при энергии 14 кэВ в разных газах: воздухе, He, Ar, Xe. Подобные зависимости сняты при энергиях инжекции 7; 9; 11,5; 16 кэВ.

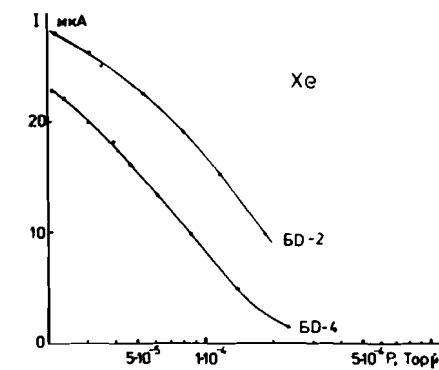
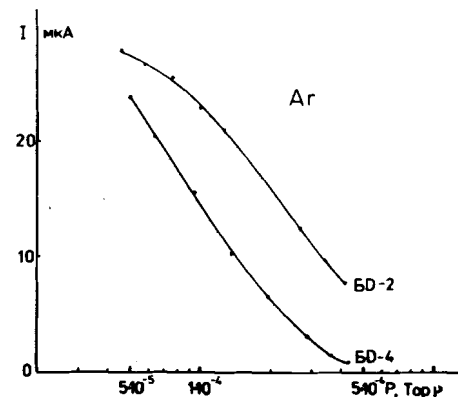
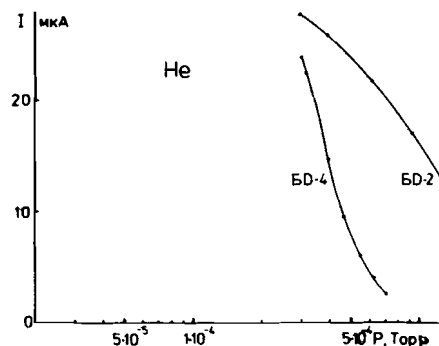
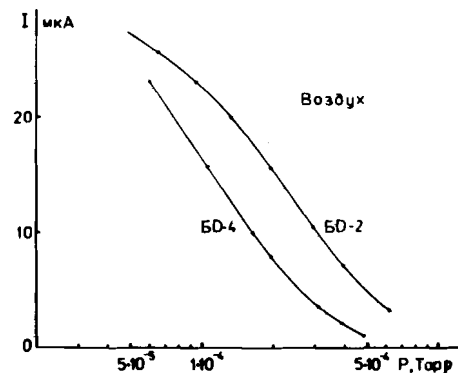


Рис. 9. Ток пучка ионов  $^4\text{He}^{1+}$  в блоках диагностики БД-2 и БД-4 в зависимости от давления в ионопроводе при напуске воздуха, He, Ar, Xe.

Измерение вакуума производилось ионизационным манометром, при этом учитывался для расчетов и в приведенных зависимостях коэффициент чувствительности к разным газам.

Потери пучка на участке между блоками диагностики БД-2 и БД-4 можно описать формулой <sup>5/</sup>

$$\frac{I_{41}}{I_{21}} = K \cdot \exp(-\sigma \cdot n \cdot L);$$

$I_{21}, I_{41}$  — ток пучка в БД-2 и БД-4;  $K$  — коэффициент оптических потерь и потерь в остаточном газе неизвестного состава;  $\exp(-\sigma \cdot n \cdot L)$  — коэффициент потерь в напускаемом газе при плотности  $n$  и сечении перезарядки  $\sigma$ . При изменении на  $\Delta n$  плотности напускаемого газа изменяется ток пучка как в блоке диагностики БД-2 ( $I_{22}$ ), так и в БД-4 ( $I_{42}$ ). Соотношение токов  $I_{21}, I_{41}, I_{22}, I_{42}$  описывается выражением

$$\frac{I_{21} \cdot I_{42}}{I_{22} \cdot I_{41}} = \exp(-\sigma \cdot \Delta n \cdot L);$$

отсюда, если взять давление в Торр, а длину в см, имеем

$$\sigma = - \frac{\ln\left(\frac{I_{21} \cdot I_{42}}{I_{22} \cdot I_{41}}\right) \cdot 10^{-16}}{3,2 \cdot \Delta p \cdot L}.$$

Полученные таким методом сечения перезарядки ионов  $^4\text{He}^{1+}$  приведены на рис. 10. Как следствие точности измерения величин тока, давления и длины ошибка  $\sigma$  составляет ~ 30%. Экспериментальные результаты в основном совпадают с рассчитанными теоретически <sup>4/</sup>, принятыми за основу при проектировании системы аксиальной инжекции.

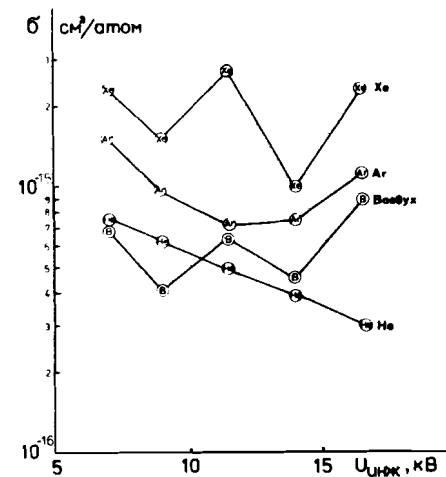


Рис. 10. Экспериментально измеренные сечения перезарядки  $^4\text{He}^{1+}$  в воздухе, He, Ar, Xe.

Использование внешнего ионного источника позволило получить рабочий вакуум во всем ускорительном зазоре не хуже  $1 \cdot 10^{-6}$  Торр. При таком давлении потери пучка из-за перезарядки на остаточном газе в процессе ускорения должны составлять менее 10%. Падение интенсивности пучка по радиусу циклотрона (рис. 11) показывает, что суммарные фазовые и вакуумные потери не превышают 16% при ускорении от  $R = 15$  см до  $R = 80$  см при напряжении на дуантах  $U_d = 60$  кВ. Снижение напряжения на дуантах приводит к резкому увеличению потерь (рис. 12), главным образом из-за того, что пучок не может обойти конструктивные элементы в центральной области циклотрона.

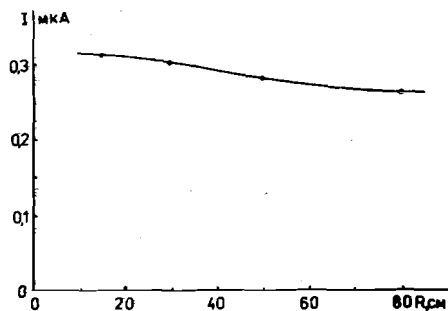


Рис. 11. Падение интенсивности пучка ионов  $^4\text{He}^{1+}$  по радиусу циклотрона.

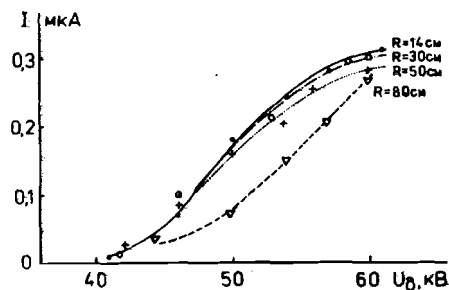


Рис. 12. Зависимость тока пучка ускоренных ионов на разных радиусах циклотрона от напряжения на дуантах.

При оптимальных условиях эффективность транспортировки пучка от сепарирующего магнита до конечного радиуса циклотрона составила 8%. Параметры системы аксиальной инжекции в У-200 в сравнении с другими аналогичными системами даны в табл. 3.

Рассмотренные в данной работе исследования были выполнены при относительно низкой интенсивности пучка ионов. Физические эксперименты, проводимые в ЛЯР, требуют высокоинтенсивных пучков ионов. Для изучения возможности трассировки по каналу внешней инжекции пучков с интенсивностью в несколько миллиампер в настоящее время создается внешний источник ионов типа дуоплазмотрона.

Центр	Пучок	Энергия инжекции, кВ	Элементы аксиального канала	Тип инфлектора	Бан чер	Эффективность транспортировки, %
Berkeley <sup>6/</sup>	тяжелые	10	SL	зеркало	+	17
CYCLONE <sup>7/</sup>	— " —	15 ÷ 18	ML	спиральный	+	12
GANIL <sup>8/</sup>	— " —	15 ÷ 18	SL	гиперболический	+	20
Grenoble <sup>9/</sup>	— " —	8 ÷ 20	ML	спиральный	+	3,5
Karlsruhe <sup>10/</sup>	— " —	10	EQ+EL	гиперболический	+	15
Julich <sup>11/</sup>	— " —	—	SL+ML	гиперболический	+	5 ÷ 8
Groningen <sup>12/</sup>	— " —	20	SL	гиперболический	+	4
ЛЯР ОИЯИ	$\text{He}^+$	15	SL+ML	зеркало	—	8

EQ — электростатические квадрупольные линзы, ML — магнитные линзы, EL — электростатические линзы, SL — соленоиды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бехтерев В.В. и др. ОИЯИ, 9-87-379, Дубна, 1987.
2. Романов В.А., Сербиллов А.Н. — ПТЭ, 1963, №1, с.27.
3. Гикал Б.Н. и др. ОИЯИ, 9-83-311, Дубна, 1983.
4. Muller A., Salzborn E. — *Ins.Phys.Conf.*, 1978, Ser N 38.
5. Гульбекян Г.Г., Иваненко А.И., Гикал Б.Н. — ЖЭТФ, 1984, т.54, в.7, с.1288-1293.
6. Clark P.J., Lyneis C.M. — *In.: Proc. 11th Intern.Conf.on Cycl. and their Appl. Tokyo. 1986, p.449.*
7. Bol J.L. et al. *IEEE Trans. on Nucl.Sci.*, 1985, NS-32, No.5, p.1817.
8. Baron E., Bex L., Bourgarel M.P. GANIL A86-03, Caen, 1986.
9. Albrand S. et al. — *In.: Proc. 11th Conf. on Cycl. and their Appl. Tokyo, 1986, p.191.*
10. Bechtold V., Friedrich L., Schulz F. — *In.: Proc. 10th Intern.Conf. on Cycl. and their Appl. Michigan, 1984, p.118.*
11. Brantigam W. et al. — *In.: Proc. 10th Intern.Conf. on Cycl. and their Appl. Michigan, 1984, p.122.*
12. Van Asselt W.K. et al. — *In.: Proc. 10th Intern. Conf. on Cycl. and their Appl. Michigan, 1984, p.177.*

Рукопись поступила в издательский отдел  
11 января 1988 года