

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

5803/83

9/II-83

P9-83-451

Г.Г.Гульбемян, А.И.Иваненко, Б.Н.Гикал

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕЗАРЯДКИ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ПРИ ИХ УСКОРЕНИИ
В ЦИКЛОТРОНАХ У-200, У-300 И У-400

Направлено в ЖТФ

1983

ВВЕДЕНИЕ

Важным процессом, приводящим к потерям тяжелых ионов при ускорении, является перезарядка их на остаточном газе.

В ряде теоретических и экспериментальных работ исследуется процесс перезарядки высокозарядных ионов средних и релятивистских энергий^{/1-7/}. В работах^{/8-10/} исследована ионизация газов тяжелыми ионами. Ряд работ посвящен перезарядке ионов на твердых мишенях^{/11/}.

В циклотронах и линейных ускорителях тяжелых ионов чаще всего используется источник типа PIC ^{/12/}, генерирующий ионы с отношением массы к заряду от 4 до 20, т.е. далекие от состояния с полной ионизацией.

В настоящей работе проведен анализ экспериментальных данных по потерям ионов при перезарядке, полученных в опытах на циклотронах ЛЯР ОИЯИ - У-200, У-300, У-400. Проведено исследование распределения давления и состава остаточного газа при разных режимах работы циклотрона У-400.

Вакуумная система изохронного циклотрона тяжелых ионов У-400 описана в работе^{/13/}. Остаточное давление до 10^{-7} Тор устанавливается в вакуумной камере объемом 25 м^3 и площадью поверхностей 300 м^2 через 24 ч после начала откачки. Газовый поток за счет газоотделения составляет $2 \cdot 10^{-3}$ Тор.л.с⁻¹ / $7 \cdot 10^{-10}$ Тор.л.с⁻¹ см⁻²/. Средняя величина внешнего натекания через неплотности камеры равна $1 \cdot 10^{-3}$ Тор.л.с⁻¹. Технологическое натекание рабочего газа в ионный источник составляет от $2,5 \cdot 10^{-3}$ до $0,8 \cdot 10^{-2}$ /Тор.л.с⁻¹/ Хе и Не соответственно. Величина газового потока, вызванная стимулированной десорбцией, при попадании на вакуумные поверхности ионного пучка, составляет величину до $2,5 \cdot 10^{-2}$ Тор.л.с⁻¹ при интенсивности ускоренного пучка до $5 \cdot 10^{13}$ 1/с. Рабочий вакуум, измеряемый расположенной на периферии в патрубке диффузионного насоса ионизационной лампой ПМИ-2, составляет $4+8 \cdot 10^{-7}$ Тор.

На рис.1 представлены характерные спектры остаточного газа в камере циклотрона У-400 в случаях:

а/ без ионного источника, в отсутствие ускоряющего напряжения и ионного пучка;

б/ при работающем ионном источнике, но в отсутствие ускоряющего напряжения /поток Хе в ионный источник составлял $3 \cdot 10^{-3}$ Тор.л.с⁻¹;

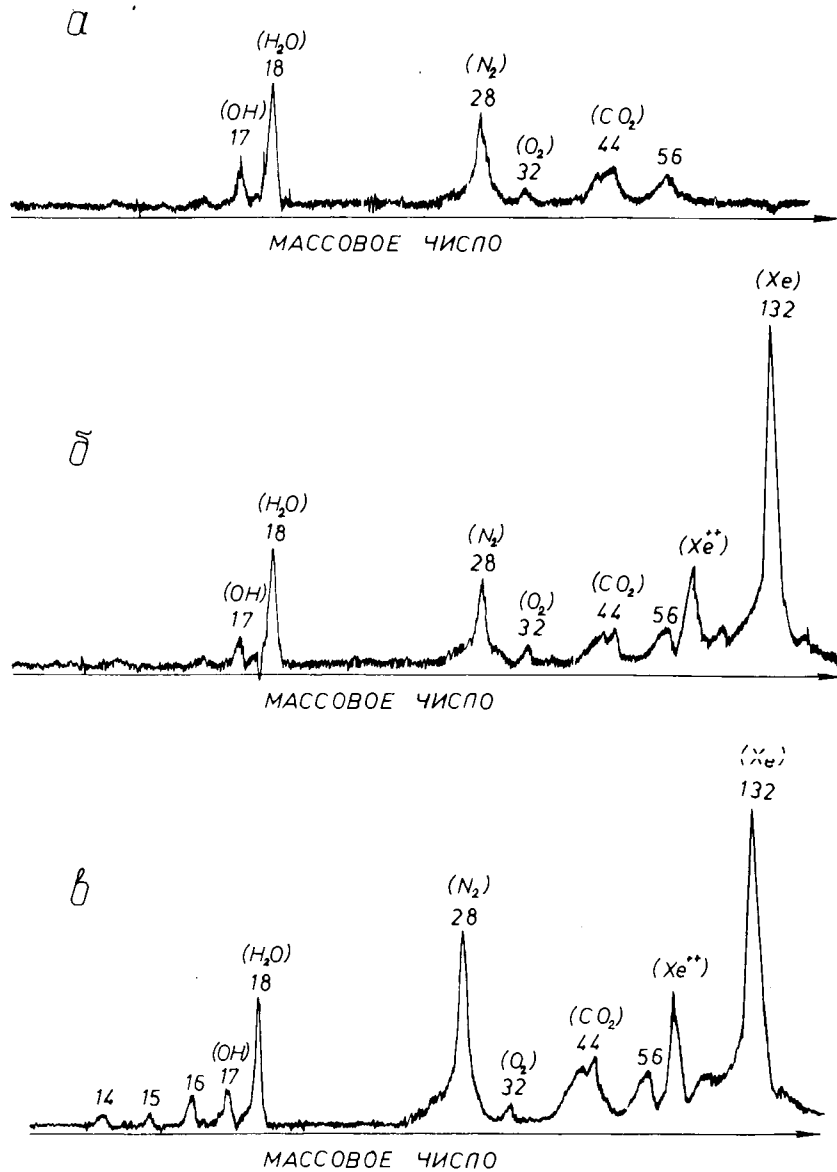


Рис.1. Спектры остаточного газа в камере циклотрона У-400 в случаях: а/ без ионного источника, в отсутствие ускоряющего напряжения и ионного пучка; б/ при работающем ионном источнике, но в отсутствие ускоряющего напряжения; в/ при наличии ускоренного пучка ионов $^{48}\text{Ti}^{+6}$ с интенсивностью $2 \cdot 10^{12}$ 1/с.

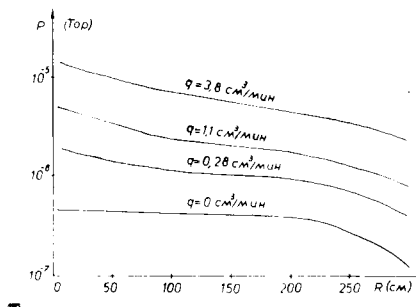


Рис.2. Радиальное распределение давления в камере циклотрона У-400 при подаче азота в центр.

в/ при наличии ускоренного пучка ионов $^{48}\text{Ti}^{+6}$ интенсивностью $2 \cdot 10^{12}$ 1/с. Спектры были сняты прибором ИПДО-2¹³/ с датчиком, расположенным в вакуумной камере и работающим в магнитном поле циклотрона.

Как следует из приведенных спектров, ускоренный пучок ионов вызывает рост пика массы 28 (CO, N_2). При интенсивности ионов $5 \cdot 10^{13} - 1 \cdot 10^{14}$ 1/с пик массы 28 является преобладающим в спектре остаточных газов.

Из-за интенсивного газового потока и ограниченной проводимости ускоряющего зазора циклотрона к периферийно расположенным насосам, для анализа потерь ионов необходимо знание радиального распределения давления.

На рис.2 представлены измеренные зависимости радиального распределения давления в камере циклотрона У-400 при подаче азота в центр камеры. Видно, что в этом случае давление в центре циклотрона растет быстрее, чем на периферии. Уже при потоке газа $0,36 \cdot 10^{-2}$ Тор.л.с⁻¹ давление в ускоряющем зазоре в 2-3 раза превышает давление на периферии.

На рис.3 представлены аналогичные зависимости при подаче азота на периферию вакуумной камеры или уменьшении скорости откачки периферийных насосов. В этом случае изменение давления на периферии равно изменению давления на всех радиусах. Такой ход зависимостей и предполагался из общих законов течения газа.

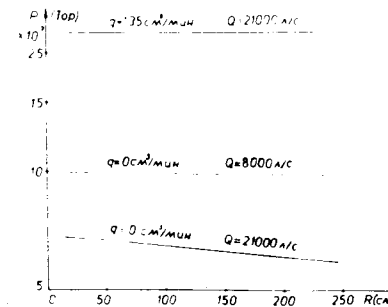


Рис.3. Радиальное распределение давления в камере циклотрона У-400 при подаче азота на периферию / q - количество подаваемого газа, Q - скорость откачки/.

Область вокруг ионного источника, являющегося локализованным источником большого количества газа /до $2 \cdot 10^{-2}$ Тор.л.с⁻¹/, вытекающего через эмиссионную щель и неплотности, может ока-

заться важной для процесса перезарядки на первых оборотах ускоряемого пучка. Давление в разрядной камере источника поддерживается на уровне 10^{-3} Тор. Исследования, проведенные на циклотроне У-300^{/14/} и вакуумной модели центральной области циклотрона У-300^{/15/}, показали, что давление в области эмиссионной щели источника ионов составляет $10^{-3} \div 10^{-4}$ Тор, быстро спадая с увеличением расстояния от щели до давления, определяемого скоростью откачки периферийных насосов, проводимостью зазоров и количеством подаваемого газа.

Истечение газа из щели источника носит направленный характер, зависящий, в основном, от геометрии эмиссионной щели источника и пулера. На рис.4а показаны зависимости давления от радиуса и угла с нормалью к щели источника ионов. На рис.4б представлены зависимости давления от радиуса и смещения от медианной плоскости.

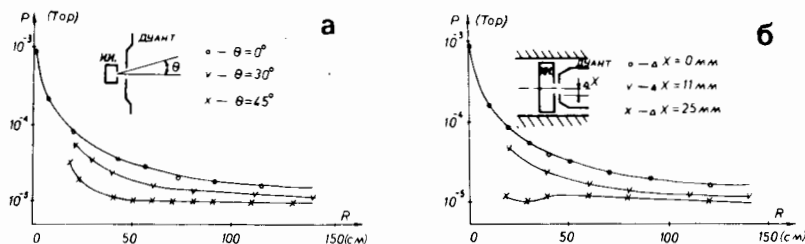


Рис.4. Зависимости давления: а/ от радиуса R и угла θ с нормалью к щели источника ионов; б/ от радиуса R и смещения Δx от медианной плоскости.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕЗАРЯДКИ

Ввиду высокой избирательности процесса ускорения в циклотронах к заряду иона, процесс перезарядки приводит к уменьшению интенсивности ускоряемых пучков. Относительные потери носят экспоненциальный характер и подчиняются зависимости

$$\frac{I_1}{I_2} = \exp[-\int \sigma_E (n_2 - n_1)_R dL], \quad /1/$$

где σ_E - сечение перезарядки при энергии E /на радиусе ускорения R /, $(n_2 - n_1)_R$ - изменение плотности атомов остаточного газа на радиусе, L - длина пути, I_1 и I_2 - интенсивности пучка ионов.

В опытах измерительные вакуумные лампы располагались на периферии вакуумной камеры. Поэтому для исключения влияния на исследование сечения перезарядки радиального распределения давления, в опытах использовалась периферийная подача газа или уменьшение скорости откачки периферийных насосов /см. рис.3/.

Для оценок потерь ионов вводился параметр интегрального сечения

$$\langle \sigma \rangle = \frac{\int \sigma dL}{L} = \frac{\ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \cdot 10^{-16}}{3,22 \cdot \Delta p \cdot L}, \quad /2/$$

где Δp - изменение давления /Тор/, L - длина пути, /см./, $\langle \sigma \rangle$ - интегральное сечение /см²/.

Длина пути L определяется радиусом ускорения, магнитным полем и темпом ускорения

$$L [м] \approx \frac{4}{3} \pi R N = \frac{H^2 R^3}{k U_d \sin \frac{\alpha}{2} \cdot q} \cdot \frac{Z}{A}, \quad /3/$$

где U_d - амплитуда напряжения на дуантах /МВ/, α - угол дуанта, k - количество дуантов, q - номер гармоники ускорения, H - магнитное поле в /кЭ/, R - радиус ускорения /м/, Z и A - заряд и массовое число иона.

Для циклотрона У-400 при $U_d = 80$ кВ, $k = 2$, $q = 2$, $H = 21$ кЭ

$$L = 3900 R^3 \frac{Z}{A}. \quad /4/$$

Ввиду определяющего значения пика массы 28 в спектре газов опыты проводились с подачей азота.

На рис.5 представлены характерные зависимости тока пучка ионов $^{53}\text{Cr}^{+5}$ от вакуума в камере циклотрона У-400 для различных радиусов ускорения, нормированные на интенсивность при исходном давлении. Вычисленные из результатов измерений по формуле /2/ интегральные сечения перезарядки ионов циклотронов У-200, У-300 и У-400 представлены на рис.6. Ошибка расчетов интегральных сечений оценена аналогично тому, как это сделано в работе /7/:

$$\frac{\delta \langle \sigma \rangle}{\langle \sigma \rangle} = \frac{1}{\ln \frac{I_1}{I_2}} \left(\frac{\delta I_1}{I_1} + \frac{\delta I_2}{I_2} \right) + \frac{\delta (p_2 - p_1)}{(p_2 - p_1)} + \frac{\delta U}{U} + \frac{\delta(\overline{\sin \phi})}{\overline{\sin \phi}} + \frac{3\Delta R}{R}. \quad /5/$$

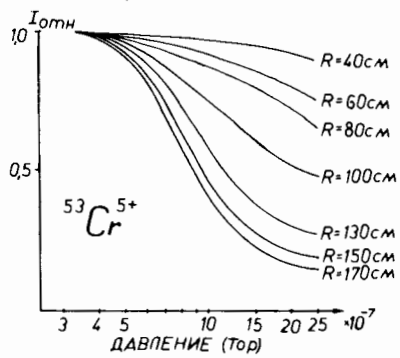


Рис. 5. Зависимости тока пучка ионов $^{53}\text{Cr}^{5+}$ от давления в камере циклотрона У-400 для различных радиусов ускорения.

Величины ошибок представлены в таблице 1.

Из полученных зависимостей потери ионов от вакуума могут быть рассчитаны дифференциальные сечения перезарядки, соответствующие сечению при данной энергии. Используем очевидные

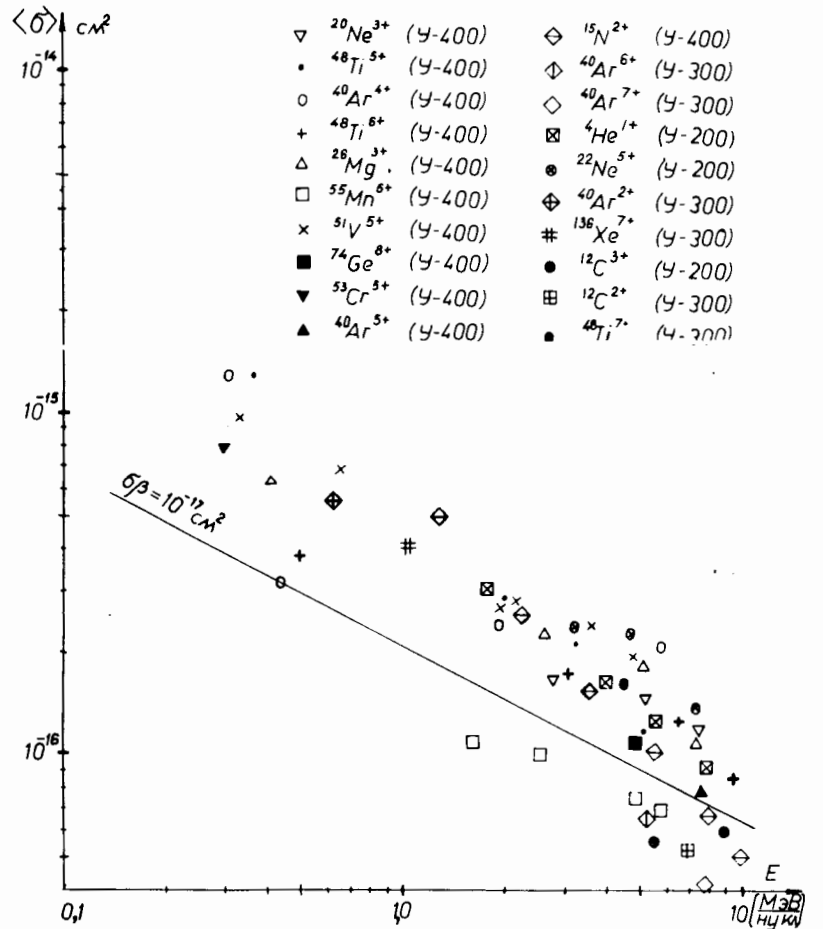


Рис. 6. Интегральные сечения перезарядки $\langle \sigma \rangle$ различных ионов в зависимости от энергии.

Таблица 1

$\frac{1}{\ln \frac{I_{R1}}{I_{R2}}} \left(\frac{\delta I_1}{I_1} + \frac{\delta I_2}{I_2} \right)$	$\frac{\delta(p_2 - p_1)}{(p_2 - p_1)}$	$\frac{\delta U}{U}$	$\frac{\delta(\overline{\sin \phi})}{\overline{\sin \phi}}$	$\frac{3\Delta R}{R}$	$\frac{\delta \langle \sigma \rangle}{\langle \sigma \rangle}$
5%	10%	5%	5%	5%	30%

Таблица 2

$\frac{1}{\ln \frac{I_{R1}}{I_{R2}}} \left(\frac{\delta I_{R1}}{I_{R1}} + \frac{\delta I_{R2}}{I_{R2}} \right)$	$\frac{\delta(p_1 - p_2)}{(p_1 - p_2)}$	$\frac{\delta U}{U}$	$\frac{\delta(\overline{\sin \phi})}{\overline{\sin \phi}}$	$\frac{3\Delta R_1}{R_1} + \frac{3\Delta R_2}{R_2}$	$\frac{\delta \sigma}{\sigma}$
5%	10%	5%	5%	10%	35%

соотношения для случая периферийной подачи газа и нормировки на исходную интенсивность

$$\ln \frac{I_{R1}}{I_{R2}} = \Delta n \left[\langle \sigma \rangle_{E_1} I_1 - \langle \sigma \rangle_{E_2} I_2 \right]$$

и

$$\langle \sigma \rangle_{E_2} L_2 = \langle \sigma \rangle_{E_1} L_1 + \Delta L \cdot \sigma,$$

где $\Delta L = L_2 - L_1$ - длина пути при ускорении от радиуса R_1 до R_2 , а σ - дифференциальное сечение перезарядки, которое при достаточно малой разности R_1 и R_2 соответствует сечению при энергии иона на этих радиусах. Аналогично [2/],

$$\sigma = \frac{\ln \frac{I_{R1}}{I_{R2}} \cdot 10^{-16}}{3,22 \cdot \Delta p \cdot \Delta L} / \text{см}^2 / . \quad /6/$$

На рис. 7 представлены значения дифференциальных сечений в зависимости от энергии для разных ионов. Результаты оценок ошибки сведены в таблицу 2.

Из-за высоких значений давления в области источника представляют интерес данные по сечениям перезарядки при энергиях, соответствующих первым оборотам в циклотроне, т.е. при энергиях, меньших 30-40 кэВ/нукл.

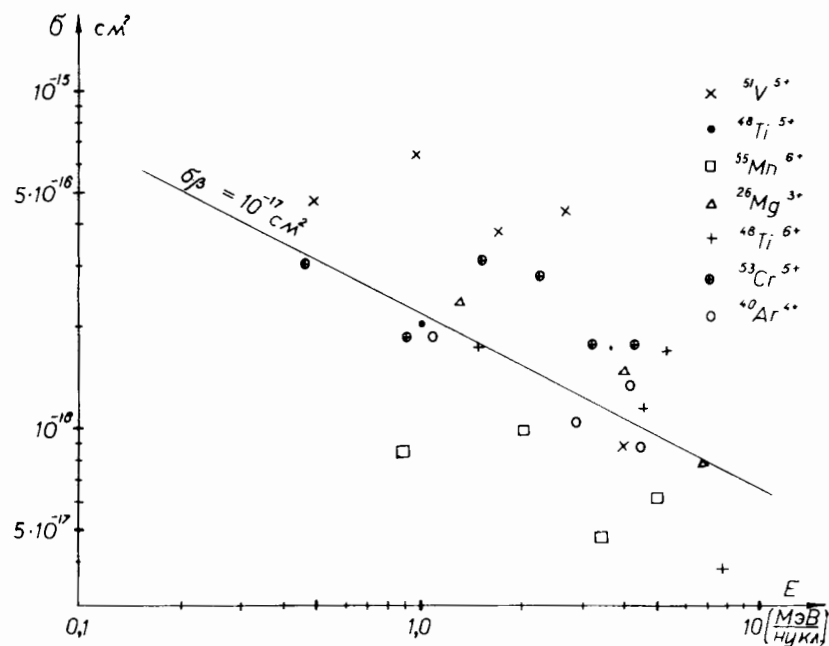


Рис. 7. Дифференциальные сечения σ перезарядки различных ионов в зависимости от энергии.

Определенные экспериментально в работе /16/ сечения перезарядки при энергиях, меньших 25 кэВ/нуклон для ионов Ne, Kr и Xe в различных газах, составляют величины до 10^{-14} см².

ВЫВОДЫ

Исследования, проведенные на циклотронах ЛЯР, позволили определить интегральные и дифференциальные сечения перезарядки ионов на остаточном газе. Как показали измерения, расчет потерь ионов следует проводить с учетом реального распределения давления в зазоре циклотрона.

Особое внимание должно быть обращено на центральную область циклотрона вокруг ионного источника, где из-за высоких значений давления /до 10^{-3} Тор/ и сечений перезарядки до 10^{-14} см² потери могут достигать 30%-70%. Значительная часть газового потока в циклотрон У-400 вызвана десорбцией, стимулированной ионами, претерпевшими перезарядку, а также широким спектром ионов различных зарядностей и масс, вытягиваемым из ионного источника.

Как следует из радиальных распределений давления в ускорительном зазоре, увеличение скорости откачки периферийно расположенных насосов циклотрона У-400 не скажется эффективно на улучшении давления в ускорительном зазоре, т.е. не вызовет уменьшения потерь ионов.

Улучшение вакуума в ускорительном зазоре циклотрона может быть достигнуто следующим образом:

- уменьшением газового потока из источника типа PIG с применением импульсной подачи газа /17/;

- созданием в центральной области дополнительных средств откачки /криогенные панели, титановые магниторазрядные насосы и др./;

- уменьшением десорбирующего действия попутных ионов путем установки в центральной области циклотрона на первых оборотах определяющих щелей;

Радикальным средством улучшения давления является инжекция ионов в циклотрон из внешнего источника.

Авторы благодарны Ю.Ц.Оганесяну, И.В.Колесову, стимулировавшим проведенную работу, Р.Ц.Оганесяну и В.Б.Кутнеру за ценные замечания, С.И.Козлову за полезные дискуссии, сотрудникам ускорительных установок Лаборатории за помощь в проведении опытов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wolfgang Erb. Umladung schwerer Ionen nach Durchgang durch Gase und Festkörper im Energiebereich 0.2 bis 1.4 MeV/v.
2. Berkner J.H. et al. Electron capture and loss cross sections for multicharged ions and argon ions in argon and molecular hydrogen LBL-5991.
3. Васильев А.А. и др. Труды РТИ, Изд. АН СССР, 1975, с. 200-215.
4. Jose Alonso et al. Charge changing cross sections for heavy ions at energies to 8.5 MeV/AMU. IEEE Trans on Nucl.Sci, 1979, v. 26, p. 3686-3687.
5. Дмитриев И.С. и др. Препринт НИИЭФА Б-0407, Л., 1978.
6. Berkner K.H. et al. Single electron capture and loss cross sections for highly stripped Fe ions in hydrogen at 3.4 MeV/nucleon Physics Letters, 1977, V62A, p. 407-408.
7. Веников Н.И. и др. Препринт ИАЭ им. И.В.Курчатова, М., 1979, с. 3214.
8. Schlachter A.S. Collisions of highly stripped ions at MeV energies in gas targets: charge transfer and ionization. Sixton Conference on the Application of Accelerators in Research & Industry. November 1980.

9. Schlachter A.S. et al. Ionization of Rate-Gas targets by collisions of fast highly charged projectiles. LBL-10944.
10. Phaneuf R.A., Meyer W. Single-electron capture by multiply charged ions of carbon, nitrogen and oxygen in atomic and molecular hydrogen. Physical Review, v. 17, No.2, February 1978, p. 534-545.
11. Deschepper Ph. et al. Charge distribution of phosphorus ions between 72 and 123 MeV. Nucl. Inst. and Methods, 1979, 166, p. 531-535.
12. Веников Н.И., Кутнер В.Б., Пасюк А.С. ОИЯИ, Р9-82-87, Дубна, 1982.
13. Гульбемян Г.Г. и др. ОИЯИ, 13-80-843, Дубна, 1980.
14. Рогозинский В.Г. ОИЯИ, 2042, Дубна, 1965.
15. Гульбемян Г.Г. и др. ОИЯИ, Р9-10117, Дубна, 1976.
16. Müller A., Salzborn E. Highly charged ions: production and charge exchange. Inst. Phys. Conf. Ser 1978, No.38, Chapter 4.
17. Пасюк А.С., Кутнер В.Б. ОИЯИ, Р9-82-47, Дубна, 1982.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д3-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
Д1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
Д1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
Д4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
Д2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
Д10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
Д1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
Д17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
Д1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
Р18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
Д2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
Д9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
Д3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 июля 1983 года.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

**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

Гульбекян Г.Г., Иваненко А.И., Гикал Б.Н. P9-83-451

Исследование процесса перезарядки тяжелых ионов при их ускорении в циклотронах У-200, У-300 и У-400

Проведено исследование распределения давления и состава остаточного газа при разных режимах работы циклотрона У-400. Проанализированы экспериментальные данные по потерям ионов при перезарядке, полученные в опытах на циклотронах У-200, У-300, У-400 ЛЯР ОИЯИ.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Gulbekian G.G., Ivanenko A.I., Gikal B.N. P9-83-451

Investigation of the Heavy Ion Charge Exchange Process at the Acceleration Using U-200, U-300 and U-400 Cyclotrons

The pressure distribution and residual gas composition have been investigated under different operating conditions of the U-400 cyclotron. The data on ion losses, occurring in the charge-exchange process, obtained in the experiments using the JINR Laboratory of Nuclear Reactions U-200, U-300 and U-400 cyclotrons are analysed.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой