

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P9-86-113

И.С.Дмитриев*, А.И.Пикин

**РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ИОНОВ ОТ ПЕРЕЗАРЯДКИ
ПРИ УСКОРЕНИИ В СИНХРОТРОНАХ**

* Научно-исследовательский институт
ядерной физики МГУ им. М.В.Ломоносова

1986

Быстрое развитие релятивистской ядерной физики определило потребность в модернизации существующих синхротронов с тем, чтобы они могли ускорять тяжелые ионы, и в разработке новых ускорителей, предназначенных для этой цели.

Основной отличительной чертой синхротронов, предназначенных для ускорения тяжелых ионов, является комплекс требований на параметры, определяющие потери ионов в процессе ускорения. Выбор этих параметров определяется сечениями перезарядки ионов на атомах остаточного газа. К сожалению, на сегодняшний день данные по сечениям перезарядки ионов весьма разрознены и поэтому понятен интерес к расчетным сечениям. Подобные расчеты проводились ранее^{1,2/}. В настоящей работе делается попытка найти связь между величиной потерь с одной стороны и энергией инжекции, давлением остаточного газа и временем ускорения - с другой. Расчеты выполнены с учетом имеющегося на сегодняшний день набора экспериментальных данных по сечениям перезарядки ионов.

Использованные в работе полные сечения изменения заряда быстрыми ионами $\sigma_T = \sum_m \sigma_{i,i+m} + \sigma_{i,i-1}$, где $\sigma_{i,i+m}$ - сечение потери m электронов $/m = 1 \div 5/$, $\sigma_{i,i-1}$ - сечение захвата электрона, рассчитывались на основе полуэмпирических методов, изложенных в^{3,4/}.

Сущность метода расчета потери электронов $\sigma_{i,i+m}$ заключается в том, что из известных величин $\sigma_{i,i+m}$ для различных ионов находятся сечения потери отдельного электрона σ_{nl} , сечения увеличения заряда S_i и относительные вероятности P_m удаления m электронов. Затем из полученных величин σ_{nl} , S_i и P_m определяются сечения $\sigma_{i,i+m}$ для других ионов, для которых отсутствуют экспериментальные данные. Для определения S_i при небольших скоростях ионов v в качестве значений σ_{nl} брались величины, полученные из эксперимента, а при высоких скоростях - борновские значения q_{nl} . Согласно расчетам сечений потери электрона быстрыми водородоподобными ионами^{5,6/}, борновское приближение справедливо при выполнении условия

$$v > 2 Z_t v_0,$$

/1/

где Z_t - заряд атома среды, $v_0 = 2,19 \cdot 10^8$ см/с. При этом в области скоростей $v > 3(I_{nl}/I_0)^{1/2}$ /где I_{nl} - энергия связи удаляемого электрона, $I_0 = 13,6$ эВ/ борновские величины σ_{nl} должны убывать с ростом v как $\sigma_{nl} \sim v^{-2}$. Более слабая асимптотическая зависимость величин $\sigma_{nl} \sim v^{-1}$, следующая из^{7/}, приводит к заметному завышению сечений потери электрона в области предельно высоких v . В работе^{3/} были выполнены расчеты сечений $\sigma_{i,i+m}$ для многозарядных ионов йода и урана с энергией $E < 200$ МэВ/нуклон при их прохожде-

нии через азот. Новые экспериментальные данные о величинах $\sigma_{i,i+m}$ для наиболее тяжелых ионов в области $E \sim 8 \div 10$ МэВ/нуклон /7,8/ позволили внести уточнения в области скоростей, где величина сечений близка к максимальной.

При расчете сечений захвата электрона было использовано то обстоятельство, что для ионов с относительно невысокими ионными зарядами i захват электрона осуществлялся главным образом в вакантное состояние ближайшей к ядру незаполненной электронной оболочки, а для ионов с высокими зарядами i , близкими к ядерному Z , сечения $\sigma_{i,i-1}$ слабо зависят от Z и определяются в основном величиной i . Для оценки значений $\sigma_{i,i-1}$ в обеих областях использовались соотношения, слабо зависящие от среды и связывающие сечения $\sigma_{i,i-1}$ для многоэлектронных систем с сечениями σ_{10} для перезарядки протонов /4,9/.

На рис.1:4 приведены расчетные зависимости сечений перезарядки многозарядных ионов аргона, железа, ксенона и урана от скорости ионов. Расчеты приведены для остаточного газа азота. Значения сечений на рисунках приведены на 1 атом мишени.

На основе этих данных проведены расчеты потерь ионов вследствие перезарядки в процессе ускорения в интервале от энергии инжекции $E_{инж}$ до конечной энергии $E_k = 760$ МэВ/нукл.

Как известно, коэффициент ослабления интенсивности ионного пучка от перезарядки K можно представить в виде:

$$K = N/N_0 = e^{-\alpha}, \quad /2/$$

N_0 - интенсивность в начале ускорения, N - интенсивность в конце ускорения.

Для синхротронов с линейным ростом магнитного поля величину α можно найти по формуле:

$$\alpha = \frac{1,67 \cdot 10^7 P \tau}{\sqrt{E_k^2 + 2E_k E_0} - \sqrt{E_{инж}^2 + 2E_{инж} \cdot E_0}} \cdot J, \quad /3/$$

P - давление в вакуумной камере синхротрона /Па/, $E_{инж}$ - энергия инжекции /МэВ/нукл., E_k - конечная энергия иона /МэВ/нукл./, E_0 - энергия покоя нуклона /938 МэВ/нукл./, τ - время ускорения иона от $E_{инж}$ до E_k /с/,

$$J = \int_{v_{инж}}^{v_k} \frac{v \sigma(v) dv}{v_{инж} \left[1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right]^{3/2}}, \quad /4/$$

v - скорость иона /см/с/, $\sigma(v)$ - полное сечение перезарядки иона /см²/.

Приведенные на рис.1-4 графические зависимости $\sigma(v)$ аппроксимировались функцией вида:

$$\sigma(v) = c_0 \left(\frac{v}{v_0} \right)^{c_1 + c_2 v + c_3 v^2} \quad /5/$$

$$v_0 = 3,07 \cdot 10^9 \text{ см/с.}$$

Коэффициенты $c_i / i = 0+3/$ для каждого иона находились по программе FUMILI. Значения интеграла J в /4/ определялись после этого численным интегрированием в указанных пределах.

На рис.5:8 приведены графические зависимости фактора $\frac{P \tau}{\alpha}$ от энергии инжекции для ионов аргона, железа, ксенона, ксенона и урана при ускорении в среде азота до энергии $E_k = 760$ МэВ/нукл. Зная время ускорения данного иона до энергии $E_k = 760$ МэВ/нукл. и давление азота в вакуумной камере синхротрона, можно по фактору $\frac{P \tau}{\alpha}$, найденному из приведенных графиков, определить величину α и, следовательно, коэффициент ослабления интенсивности.

Авторы выражают признательность И.Б.Иссинскому и И.Н.Семешкину за инициирование работы и полезные обсуждения.

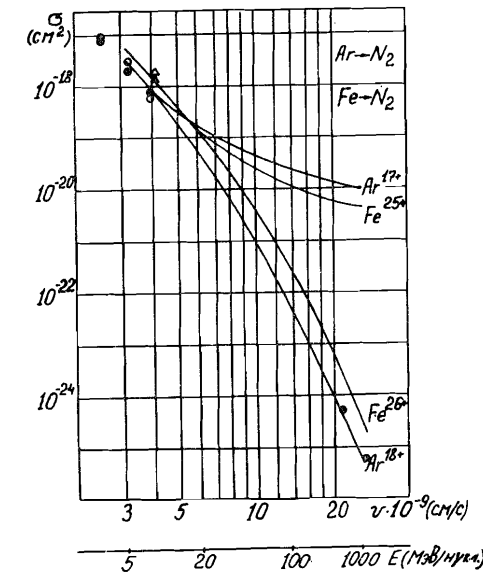


Рис.1. Полные сечения перезарядки ионов аргона и железа в среде азота. \circ - $Ar^{18+}/8/$, \bullet - $Ar^{17+}/8/$, \circ - $Ar^{18+}/12/$, Δ - $Fe^{26+}/8/$, Δ - $Fe^{25+}/8/$.

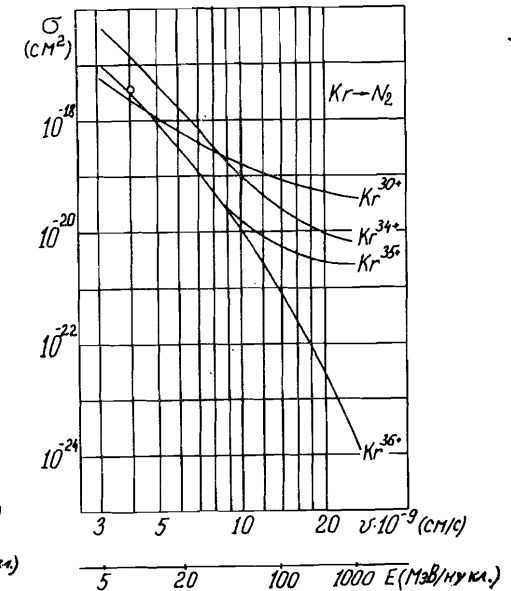


Рис.2. Полные сечения перезарядки ионов ксенона в среде азота \circ - $Kr^{33+}/8/$.

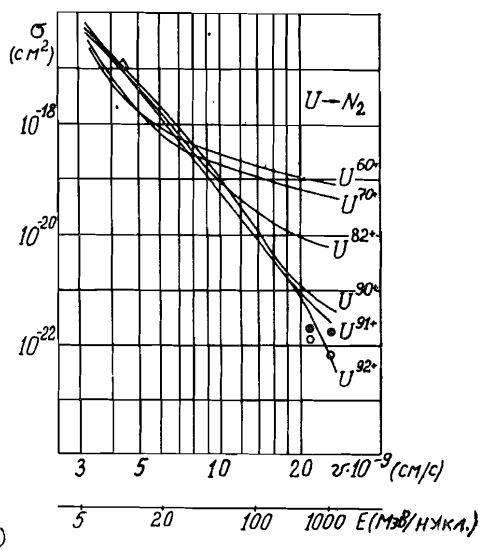
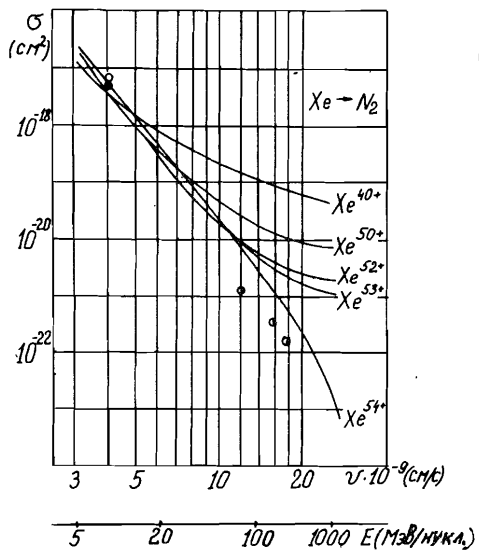


Рис.3. Полные сечения перезарядки ионов ксенона в среде азота. \circ - Xe^{46+/8/}, \bullet - Xe^{41+/8/}, \bullet - Xe^{54+/10/}.

Рис.4. Полные сечения перезарядки ионов урана в среде азота. Δ - U^{63+/7/}, \circ - U^{92+/11/}, \bullet - U^{91+/11/}.

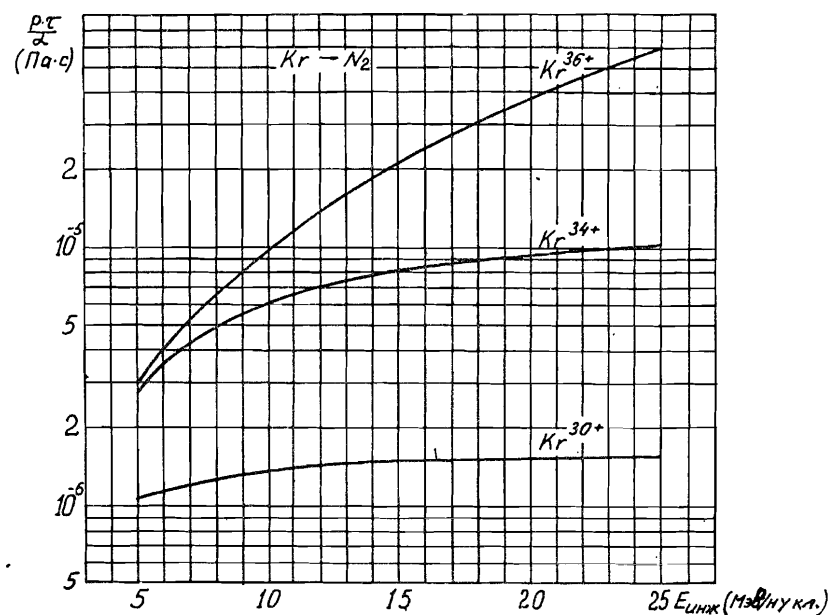


Рис.6. Зависимость фактора $\frac{P_r}{a}$ от энергии инжекции для ионов криптона.

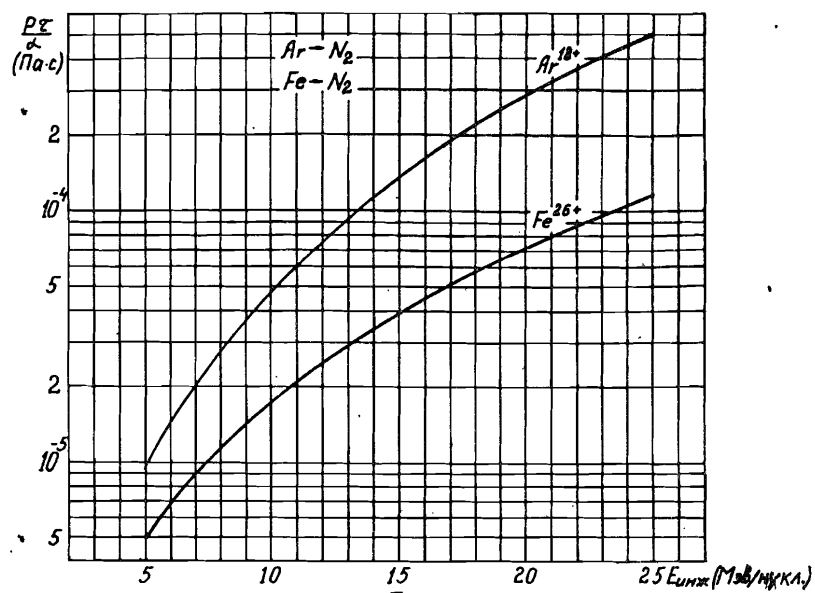


Рис.5. Зависимость фактора $\frac{P_r}{a}$ от энергии инжекции для ионов аргона и железа.

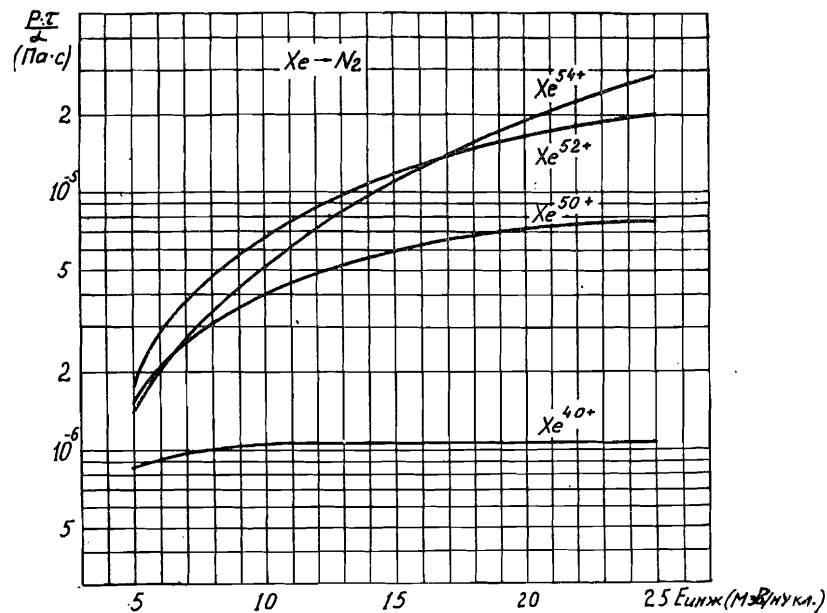


Рис.7. Зависимость фактора $\frac{P_r}{a}$ от энергии инжекции для ионов ксенона.

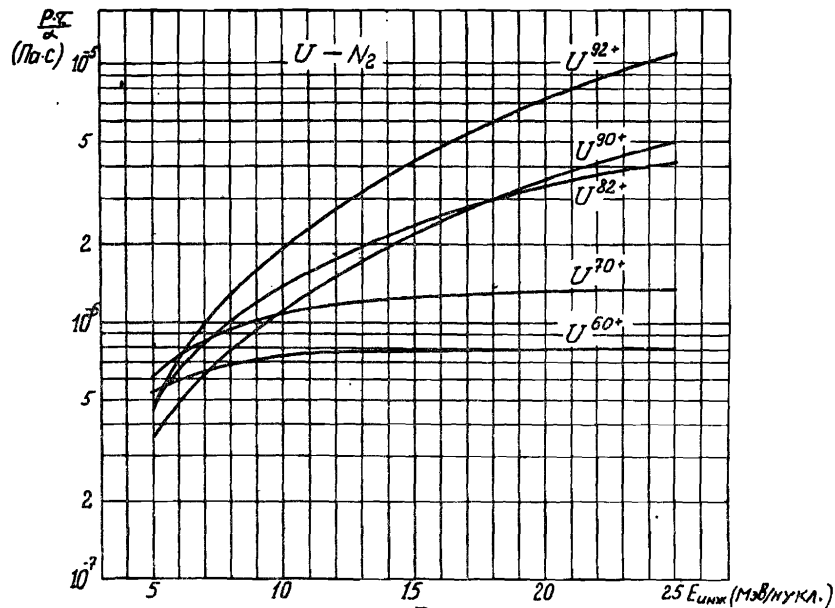


Рис. 8. Зависимость фактора $\frac{P_T}{a}$ от энергии инжекции для ионов урана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев И.С., Саксаганский Г.Л., Шукейло И.А. Препринт НИИЭФА, Б-0407, Л., 1978.
2. Ершов Б.Д., Саксаганский Г.Л., Филиппова Л.В. Вакуумные системы синхротронных ускорителей и ускорительно-накопительных комплексов. Обзор НИИЭФА ОА-49, Л., 1982.
3. Dmitriev I.S., Zaikov V.P., Tshaev Yu.A. Nucl.Instr.Meth., 1979, 164, p.329.
4. Dmitriev I.S., Nikolaev V.S., Teplova Ya.A. SPIG-80, Dubrovnic, 1980, p.72.
5. Дмитриев И.С., Жилейкин Я.М., Николаев В.С. ЖЭТФ, 1965, 49, с.500.
6. Сенашенко В.С. и др. Вестник МГУ, сер. физ. астр., 1970, № 2, с.136.
7. Franzke B. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1981, NS-28, No.3, p.2116.
8. Alonso J., Dietrich D., Gould H. LBL-8932, Berkeley, 1979.
9. Николаев В.С., 1965, УФН, 85, 679.
10. Thieberger P. et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., 1985, NS-32, No.5, p.1767.
11. Gould H. et al. LBL-16467, Berkeley, 1983.
12. Raisbec G.M. et al. Proc. 15th Int.Cosmic Ray Conf., Plovdiv, Bulgaria, 1977, 2, p.67.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 февраля 1986 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

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

D17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
P18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
D2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
D9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
D3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
D11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.
D13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
D2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
D1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
D17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р. 75 к.
D10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983	3 р. 50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984 /2 тома/	13 р. 50 к.
D4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра, Алушта, 1985.	3 р. 75 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 99
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

Дмитриев И. С., Пикин А. И.
Расчет потерь ионов от перезарядки
при ускорении в синхротронах

P9-86-113

На основе полуэмпирического метода рассчитаны полные сечения перезарядки тяжелых ионов различной зарядности в среде азота. На основе этих сечений найдены потери ионов от перезарядки при ускорении в синхротронах с линейным ростом магнитного поля. Потери ионов рассчитаны при ускорении до энергии 760 МэВ/нукл., интервал энергий инжекции (5 ÷ 25) МэВ/нукл. Результаты представлены в виде графических зависимостей $\sigma(v)$ и $pr/a (E_{инж})$ для ионов аргона, железа, криптона, ксенона и урана.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О. С. Виноградовой

Dmitriev I. S., Pikin A. I.
Calculation of Ion Losses Due to Recharge
at Acceleration in Synchrotrons

P9-86-113

Basing on semiempirical method the total heavy ion re-charge cross sections of heavy ions of different charges are calculated in nitrogen. On the basis of these cross sections ion losses have been determined due to recharging at the acceleration in synchrotrons with linear growth of magnetic field. Ion losses have been calculated at the acceleration up to 760 MeV/nuc, for injection energy range (5÷25) MeV/nuc. The results are presented as graphical functions $\sigma(v)$ and $pr/a (E_{injec})$ for argon, iron, crypton, xenon and uranium ions.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna' 1986