

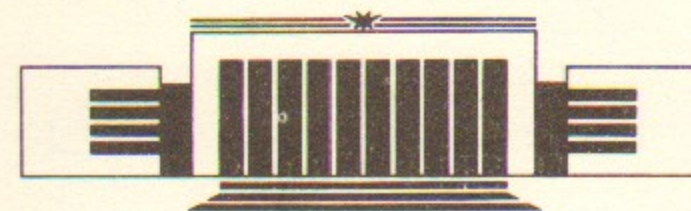


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

С.Ю. Таскаев

**ЭКСПЕРИМЕНТЫ
С ЦЕЗИЕВЫМ АНАЛИЗАТОРОМ
АТОМОВ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ**

ПРЕПРИНТ 90-139



НОВОСИБИРСК

Эксперименты с цезиевым анализатором
атомов низких энергий

С.Ю. Таскаев

Институт ядерной физики
630090, Новосибирск 90, СССР

АННОТАЦИЯ

Анализатором, основанным на преобразовании атомов в отрицательные ионы на мишени из паров цезия, измерены потоки атомов перезарядки «теплой» и высокотемпературной плазмы в диапазоне энергий 30—3000 эВ.

Experiments with the Cesium Neutral
Particle Analyzer

S.Yu. Taskaev

АБСТРАКТ

A cesium neutral particle analyzer is described. The analyzer is based on the conversion of atoms into negative ions in Cs vapour target. The energy spectrum of the low energy charge-exchange atoms (30—3000 eV) emitted from plasma was measured using cesium neutral particle analyzer. The results of the measurement are presented here.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для анализа атомов низких энергий (~ 100 эВ), по-прежнему, остается актуальной задача повышения эффективности преобразования атомов в ионы.

Один из методов, не требующий выполнения довольно жестких условий, характерных для других (например, поддержание высокого вакуума и контроль за состоянием поверхности), основан на преобразовании атомов в отрицательные ионы на мишени из паров цезия. На рис. 1 и 2 приведены необходимые сечения данного процесса и равновесный выход ионов H^- . Видно, что в области энергий 100—1000 эВ может быть достигнута высокая эффективность преобразования атомов водорода в отрицательные ионы, а минимальная разница потенциалов ионизации цезия ($I=3,89$ эВ) и электронного сродства водорода ($S=0,75$ эВ) позволяет осуществить это преобразование с незначительной потерей энергии.

2. ЦЕЗИЕВЫЙ АНАЛИЗАТОР АТОМОВ

Для преобразования атомов в отрицательные ионы на мишени паров цезия была разработана малогабаритная импульсная цезиевая мишень [5], и на ее основе создан анализатор атомов низких энергий, схема которого представлена на рис. 3. Струя цезия создается при открывании клапана, в котором цезий нагревается до температуры 350°C , и формируется уплотняющей крышкой и стенками корпуса. Плотность потока цезия контролируется датчиком с поверхностной ионизацией. Получаемая цезиевая мишень длитель-

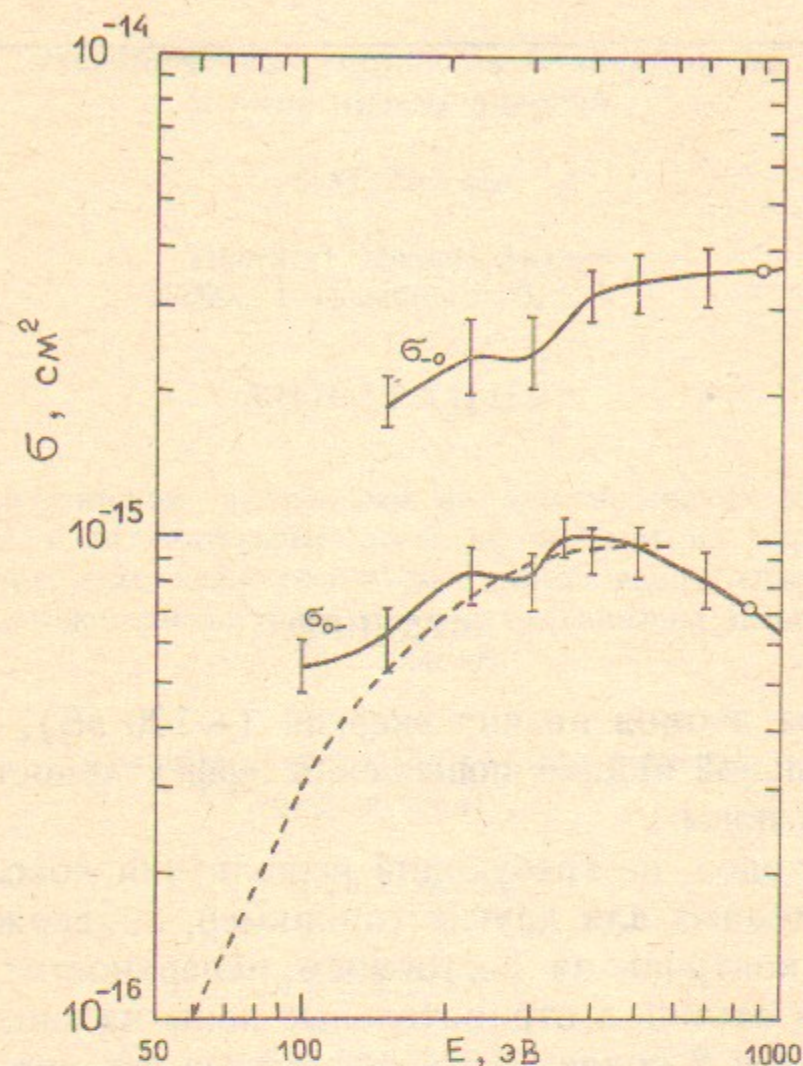


Рис. 1. Зависимость от энергии сечений потери электрона σ_{0-} для H^0 и захвата электрона σ_{00} для H^- . Сплошная кривая — экспериментальные результаты [1]; штриховая — расчетные [2].

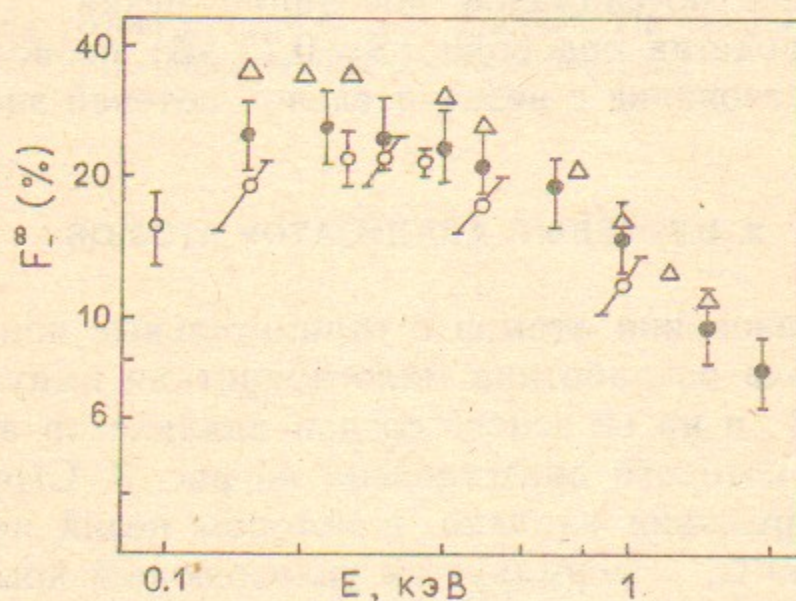


Рис. 2. Равновесный выход H^- в цезии F_{∞} в зависимости от энергии: ● — [1]; ○ — [3]; △ — [4].

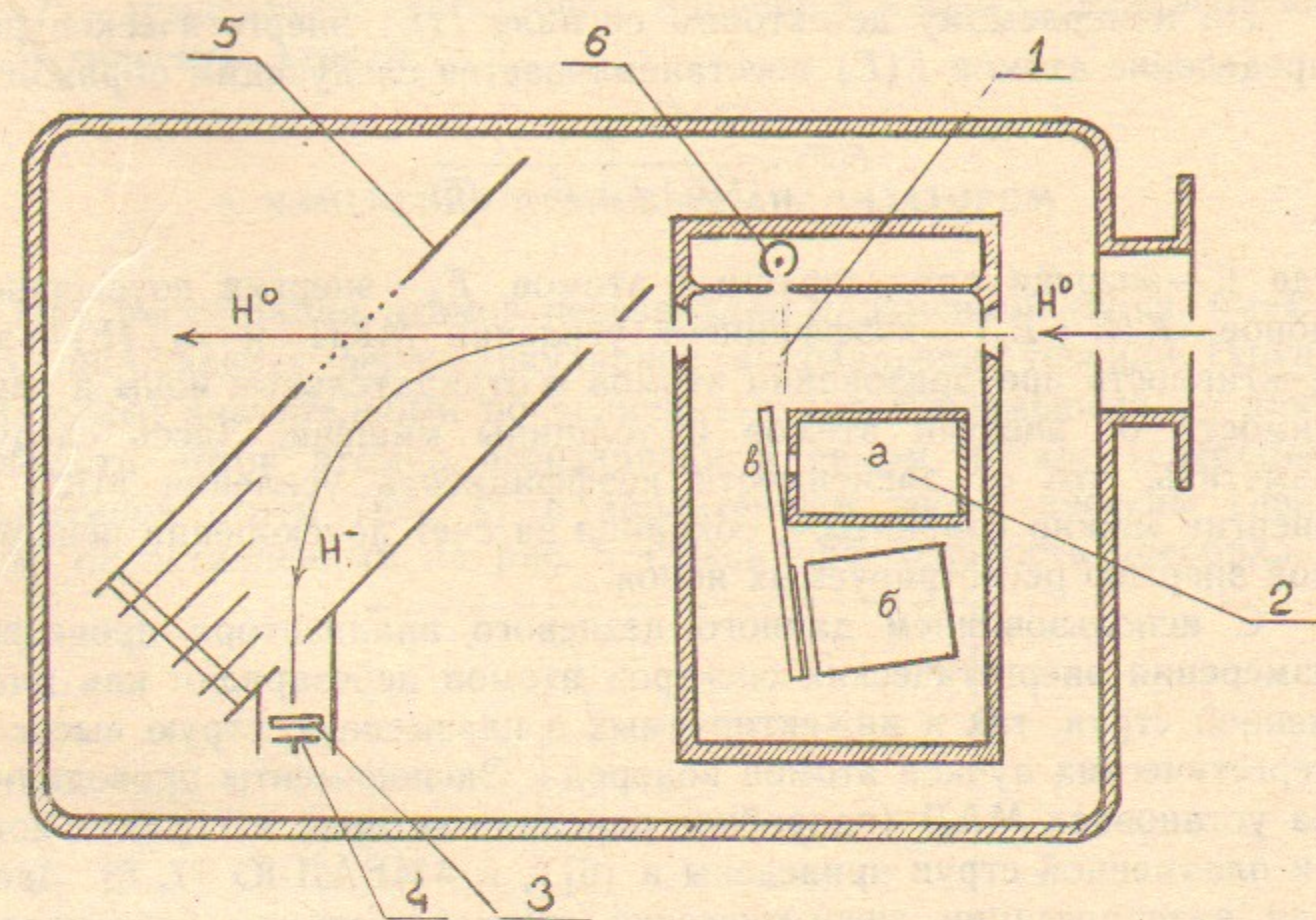


Рис. 3. Цезиевый анализатор атомов низких энергий:

1 — струя цезия; 2 — импульсный клапан (а — контейнер с цезием, б — электромагнит, в — уплотняющая крышка); 3 — микроканальная пластина; 4 — детектор; 5 — 45-градусный электростатический анализатор; 6 — датчик потока цезия.

ностью более 10 мс имеет толщину 10^{14} cm^{-2} , что позволяет достигнуть 5–10%-го преобразования атомов водорода энергией 100–1000 эВ в отрицательные ионы [5], которые затем анализируются по энергии 45-градусным электростатическим анализатором и регистрируются детектором с микроканальной пластиной (МКП) с коэффициентом усиления до 10^4 . Для уменьшения зависимости коэффициента усиления МКП от энергии ионов последние доускоряются в промежутке между выходной щелью 45-градусного электростатического анализатора и входной поверхностью МКП. Чувствительность цезиевого анализатора по плотности потока атомов составляет величину $\geq 10^{-10}$ экв.А/см² при энергетическом разрешении $\Delta E/E = 7 \cdot 10^{-2}$.

Было измерено отношение потоков цезия при открытом и закрытом клапане, и оно оказалось равным 500. Такая величина уплотнения клапана обеспечивает возможность работы при однократной заправке цезия в течение 10 часов с количеством открываний клапана до 10^3 .

По измеряемому детектором сигналу $I(E)$ энергетическое распределение атомов $F(E)$ восстанавливается следующим образом:

$$F(E) \sim \frac{I(E)}{K(E + E_d) \cdot E \cdot \kappa_0(E)},$$

где E — энергия анализируемых атомов, E_d — энергия доускорения ионов, $K(E + E_d)$ — коэффициент усиления МКП, и $\kappa_0(E)$ — эффективность преобразования атомов в отрицательные ионы в зависимости от энергии атомов и толщины мишени. Здесь следует заметить, что от зависимости коэффициента усиления МКП от энергии можно избавиться, сохраняя за счет доускорения неизменной энергию регистрируемых ионов.

С использованием данного цезиевого анализатора проведены измерения энергетических спектров атомов перезарядки как плазменной струи, так и инжектируемых в плазменную струю высокоэнергетических пучков атомов водорода. Эксперименты проводились на установках МАЛ (подробное описание которой и характеристики плазменной струи приведены в [6]), и АМБАЛ-Ю [7, 8]. Здесь для интерпретации энергетических спектров атомов перезарядки необходимо отметить следующее:

1. Энергетическое распределение ионов плазмы $F_i(E)$ выражается через измеряемый спектр атомов $F(E)$ как $F_i(E) \propto F(E) / \sigma_{ex}$, где σ_{ex} — сечение перезарядки, которое в случае перезарядки на окружающем газе довольно слабо зависит от энергии [9, 10] (например, протон на водороде: $\sigma_{ex} \propto E^{-1/4}$).

2. При инжекции моноэнергетических атомарных пучков в мишенную плазму функция распределения захваченных ионов в предположении независимости от энергии времени торможения τ_{st} и жизни τ описывается выражением:

$$F_i(E) \propto E^{\frac{\tau_{st}}{\tau} - 1},$$

где время торможения τ_{st} определяется по временному сдвигу сигналов, соответствующих различным энергиям. Также при регистрации необходимо учесть рассеяние захваченных ионов на ионах мишенной плазмы, которое связано с величиной потери энергии соотношением:

$$\langle \theta^2 \rangle = \frac{3\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{M_i}{m}} \left(\frac{T_e}{E} \right)^{3/2} \left(1 - \sqrt{\frac{E}{E_0}} \right), \quad (1)$$

где T_e — температура электронов мишенной плазмы, E_0 — энергия инжектируемых атомов.

3. ИЗМЕРЕНИЯ ЦЕЗИЕВЫМ АНАЛИЗАТОРОМ

При регистрации атомов перезарядки плазменной струи, имеющих направление перпендикулярное направлению течения струи, обнаружен значительный по величине и кратковременный по длительности поток атомов перезарядки в самом начале генерации плазменной струи (рис. 4) с характерным энергетическим спектром, представленным на рис. 5 (здесь эффективность преобразо-

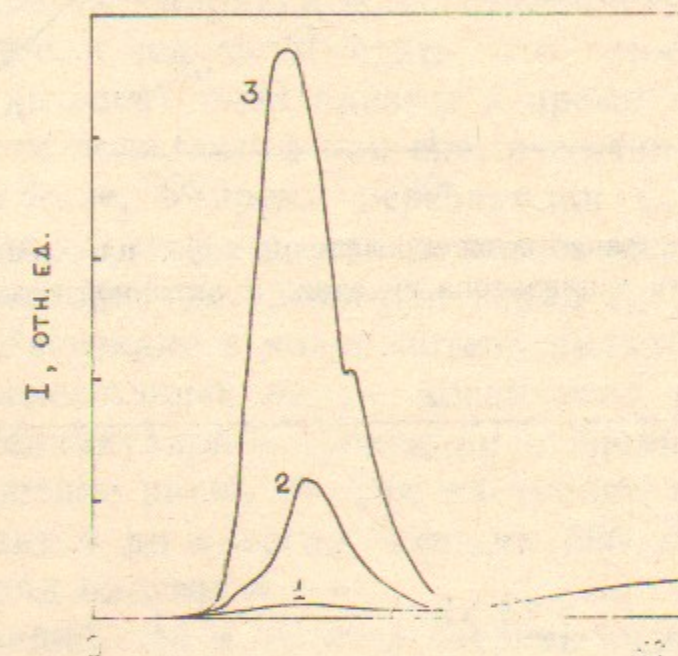


Рис. 4. Регистрируемый поток атомов перезарядки плазменной струи: 1 — напуск водорода в источник за $\tau_3 = 2$ мс до поджига разряда и в момент поджига вакуума в пробкотроне $P \sim 5,5 \cdot 10^{-3}$ Па; 2 — $\tau_3 = 3$ мс, $P \sim 10^{-1}$ Па; 3 — $\tau_3 = 4$ мс, $P > 10^{-1}$ Па.

вания при энергиях, меньших 100 эВ, бралась из теоретических работ, поскольку экспериментальные данные отсутствуют). Выяснено, что поток атомов перезарядки преимущественно в поперечном направлении определяется механизмом нагрева ионов (см. [11]), величина потока задается начальным вакуумом, а продолжительность объясняется изотропизацией ионов по скоростям с ростом плотности плазмы и изменением плотности окружающего плазму газа.

При регистрации атомов перезарядки вдоль оси установки измерен энергетический спектр ионов в протяженной и короткой плазменных струях (рис. 6), отличающихся только тем, что в

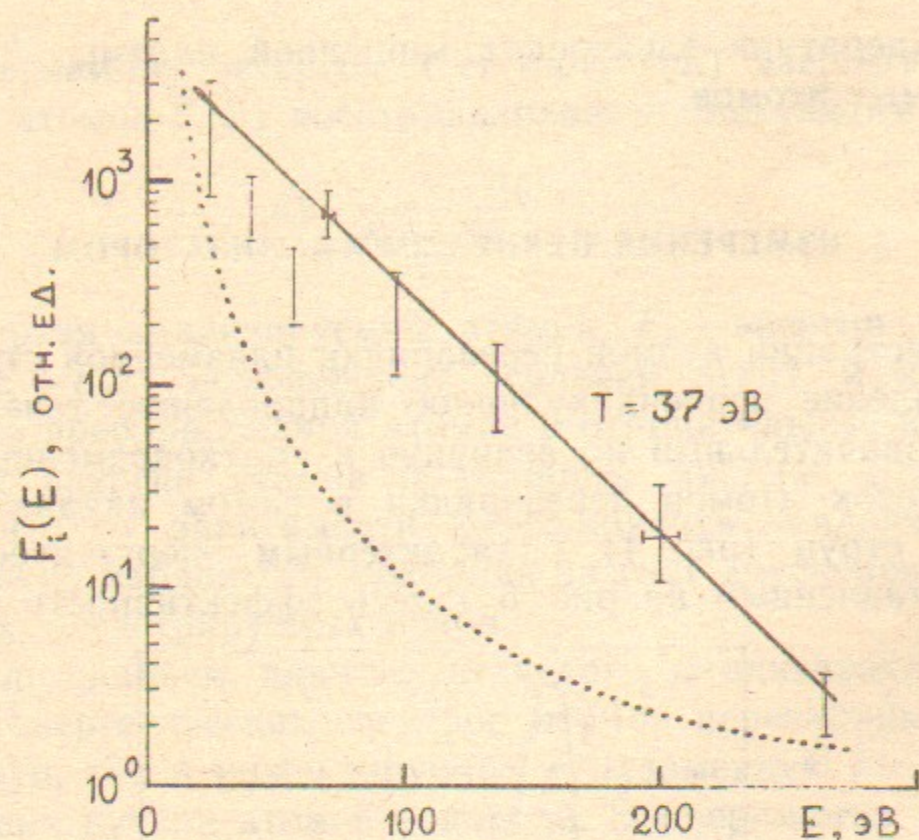


Рис. 5. Поперечное энергетическое распределение ионов плазменной струи. Чувствительность анализатора показана пунктирной кривой.

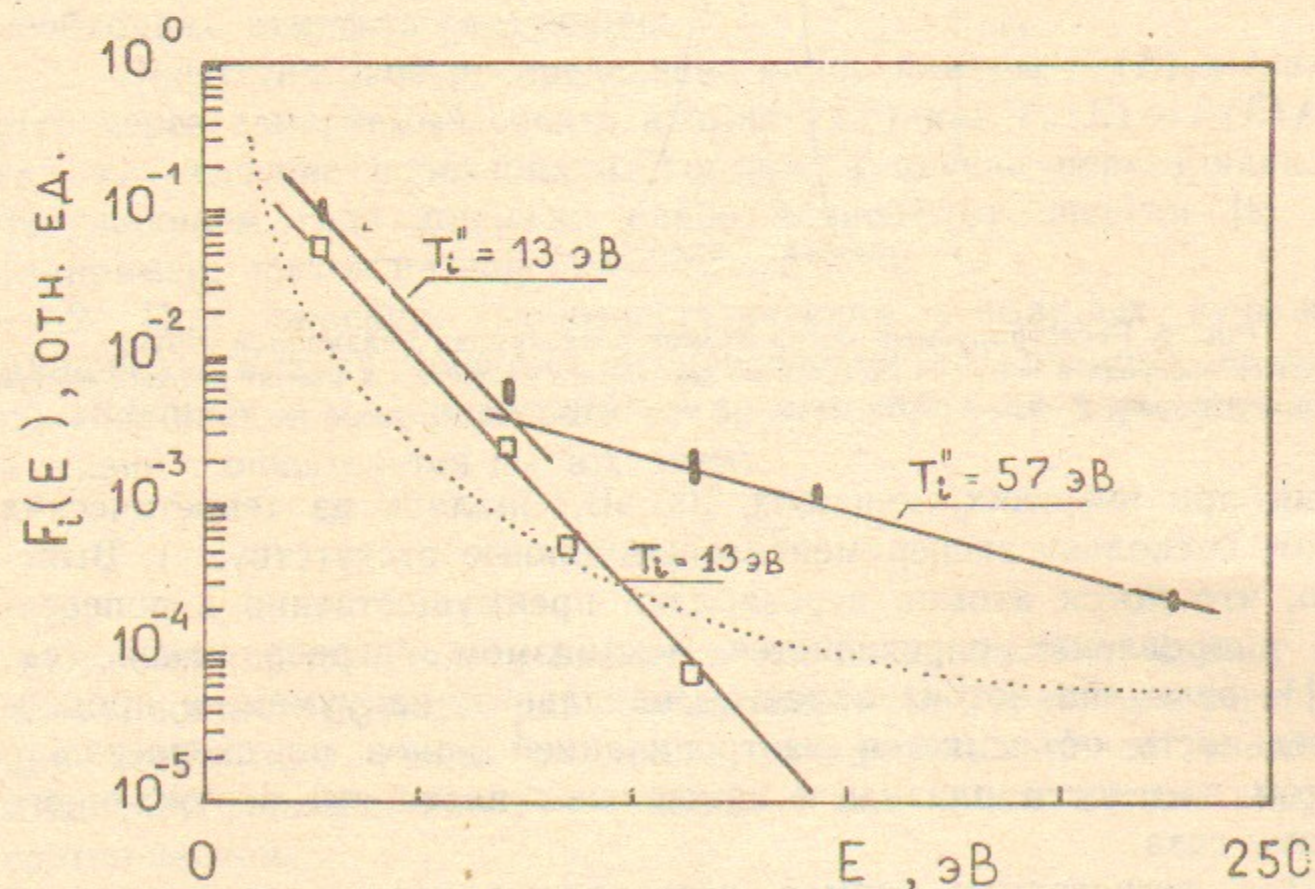


Рис. 6. Энергетический спектр ионов в протяженной (●) и короткой (□) плазменной струе.

короткой плазменной струе неустойчивость Кельвина—Гельмгольца не развивается [6], и данное измерение наглядно показывает связь неустойчивости Кельвина—Гельмгольца и механизма нагрева ионов [11].

Проведены эксперименты по регистрации атомов перезарядки инжектируемых в плазму пучков атомов водорода энергией 4 кэВ и током 0,2 экв.А (на установке МАЛ) и энергией 18 кэВ и током 40 экв.А (на установке АМБАЛ-Ю). Инжекция ведется в центральной плоскости пробкотрона. Ось наблюдения анализатора находится в той же плоскости под углом 90° к направлению инжекции. На рис. 7 представлены измеренное энергетическое распределение атомов перезарядки и восстановленное распределение захваченных ионов. Следует отметить, что торможение захваченных ионов идет на электронах плазмы и время торможения τ_{dr} не зависит от энергии иона, тогда как время жизни определяется как перезарядкой на газе, и время перезарядки τ_{ex} , можно считать, также не зависит от энергии, так и рассеянием ионов на ионах плазмы в конус потерь, где время рассеяния τ_{sc} существенно зависит от энергии. Рассеяние в конус потерь является основным процессом потерь захваченных ионов, когда угол рассеяния их при изначально перпендикулярной инжекции становится примерно 45° (пробочное отношение равно 2). Это наступает, согласно (1), когда ион затормозится до энергии порядка 500 эВ (считается, что эффективный заряд плазмы $Z=1$).

Из рис. 7,б видно, что в области энергий выше 1 кэВ энергетическое распределение захваченных ионов описывается функцией $F_i(E) \propto E^{\frac{\tau}{\tau_{dr}} - 1}$ с $\tau \gg 3\tau_{dr}$, что указывает на независимость времени жизни от энергии, т. е. на перезарядку как основной процесс потерь ионов. При энергии ниже 1 кэВ становится существенным и преобладающим уход ионов в конус потерь.

При инжекции атомарного пучка в плазменную струю, генерируемую щелевым газоразрядным источником [12], на установке АМБАЛ-Ю измерены потоки атомов перезарядки при различных энергиях. Результаты аналогичны описанным выше, а именно, $\tau_{ex} \gg 3\tau_{dr}$, и рассеяние в конус потерь существенно при энергиях ниже 1 кэВ, что дает оценку на время жизни по рассеянию $\tau_{sc} = 3,6\tau_{dr}$. Было обнаружено [8], что при атомарной инжекции плотность мишенной плазмы значительно уменьшается, однако вопрос о том, как и куда исчезает часть плазмы, остается пока невыясненным. Результаты измерений цезиевым анализатором поз-

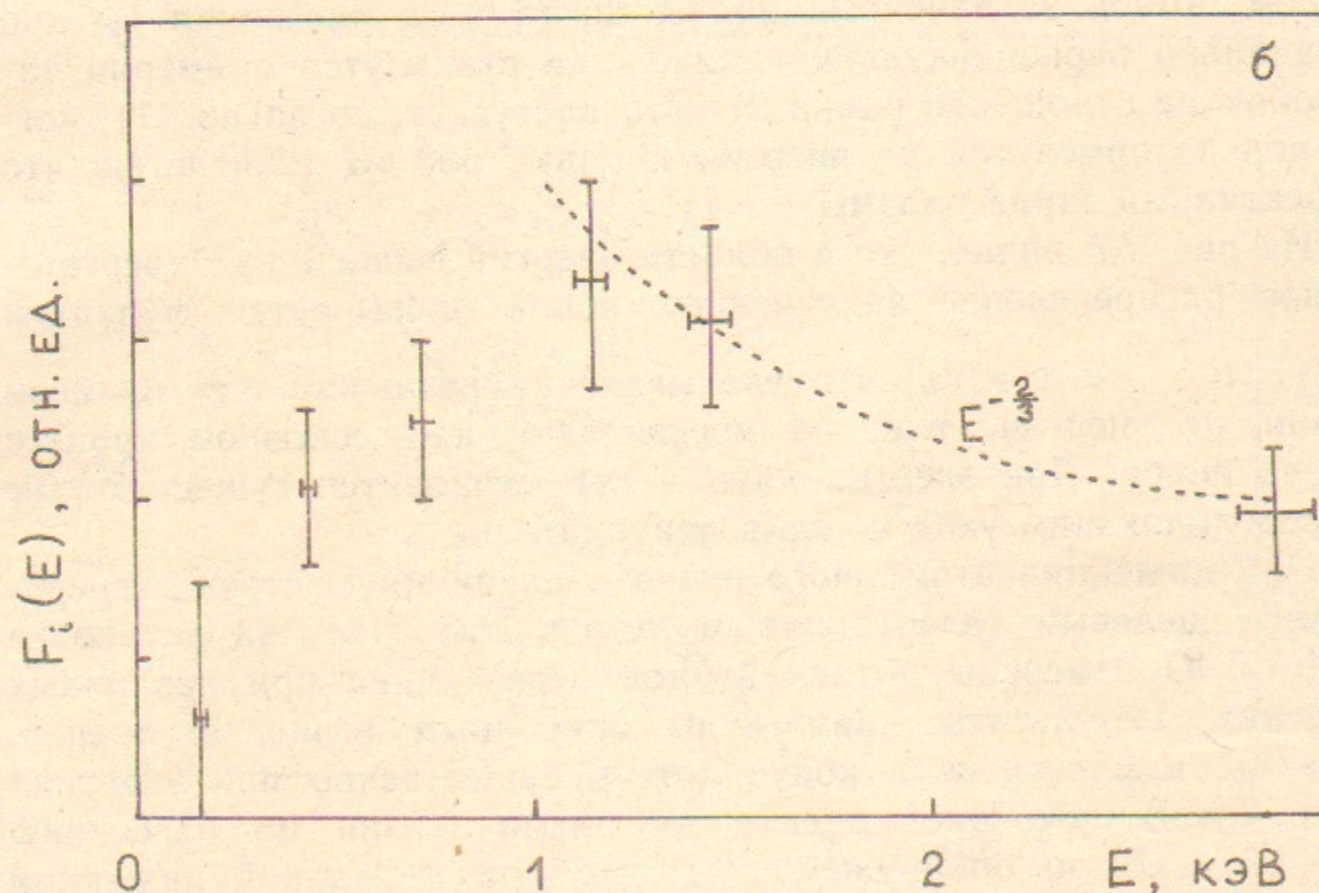
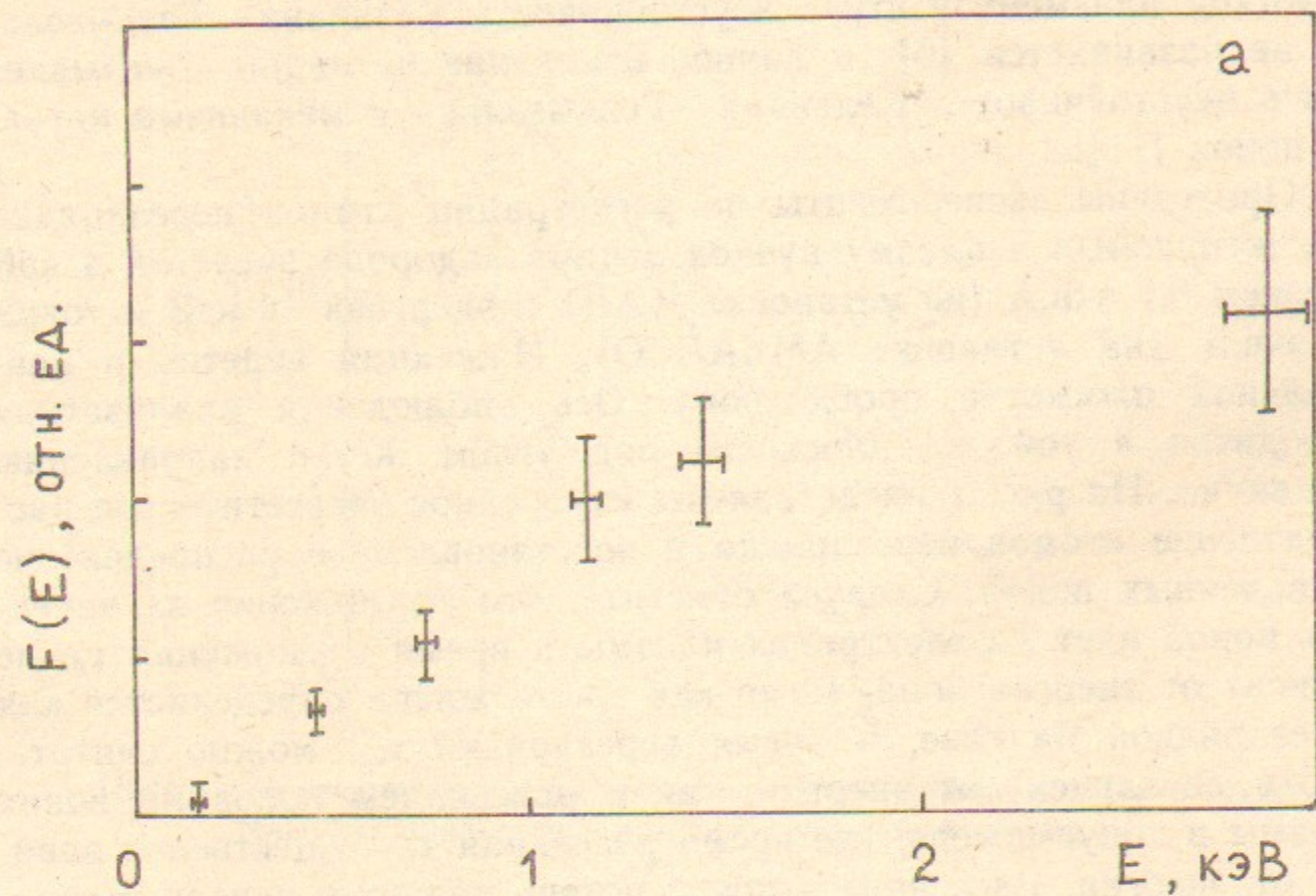


Рис. 7. Энергетические распределения атомов перезарядки (а) и захваченных ионов (б) инжектируемого в плазму пучка атомов водорода энергией 4 кэВ.

воляют дать оценку в $\leq 2 \cdot 10^{-11}$ экв.А/эВ·см² в месте регистрации (3 м до оси установки) на изменение во время инжекции плотности потока атомов в диапазоне энергий 100—300 эВ.

Таким образом в данных экспериментах цезиевым анализатором атомов низких энергий измерены энергетические спектры атомов перезарядки «теплой» и высокотемпературной плазмы в диапазоне энергий 30—3000 эВ. Полученные результаты оказали значительную помощь в объяснении целого ряда явлений как в плазменной струе, так и при инжекции в струю мощных высокоэнергетических атомарных пучков.

В заключение выражаю искреннюю благодарность В.Г. Дудникову за предоставленную возможность проведения работы и А.А. Кабанцеву за интерес к работе и полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Meyer F.W. J. Phys. B: Atom. Molec. Phys., 1980, v.13, p.3823.
2. Olson R.E. Phys. Lett., 1980, v.77A, p.143.
3. Meyer F.W. Bull. Am. Phys. Soc., 1978, v.23, p.1108.
4. Schlachter A.S. Proc. Symp. on the Production and Neutralization of Negative Ions and Beams. Brookhaven National Laboratory, 1977, BNL 50727, p.11.
5. Дудников В.Г., Ефимов В.П., Фиксель Г.И. ПТЭ, 1983, т.6, с.138.
6. Кабанцев А.А., Таскаев С.Ю. Физика плазмы, 1990, т.16, с.700.
7. Кабанцев А.А., Карлинер В.М., Соколов В.Г. и др. Препринт ИЯФ СО АН СССР 89-46. Новосибирск, 1989.
8. Bender E.D., Chupriyanov V.E., Dimov G.I. et al. Intern. School of Plasma Physics. Varenna (Como), Italy, 1990 (in print).
9. Barnett C.F., Ray J.A. et al. Atomic Data for Contr. Fusion Res.—Preprint ORNL-5206, 1977.
10. Friman R.L. and Jones E.M. Atomic Processes in Plasma Physics Experiments.—Culham Laboratory, Abingdon, Berkshire, 1974.
11. Кабанцев А.А., Таскаев С.Ю. Препринт ИЯФ СО АН СССР, 90-70. Новосибирск, 1990.
12. Димов Г.И., Кабанцев А.А., Таскаев С.Ю. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 1989, вып.3, с.58.

С.Ю. Таскаев

**Эксперименты с цезиевым анализатором
атомов низких энергий**

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 3 декабря 1990 г.
Подписано в печать 3.12. 1990 г.
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,3 печ.л., 1,0 уч.-изд.л.
Тираж 200 экз. Бесплатно. Заказ № 139.

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и
отпечатано на ротапринтере Института ядерной физики
СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*