

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ 6

А.А.Иванов, Г.В.Росляков

**КОНВЕРСИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ
ИОНОВ ВОДОРОДА В АТОМЫ
В ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ
МИШЕНИ**

ПРЕПРИНТ 80-20

Работа поступила 17 октября 1979 года

Ответственный за выпуск С.Г.ПОПОВ
Подписано к печати 17.01 1980 г. МНО6026
Усл.0,8 печ.л., 0,6 учетно изд. л.
Тираж 150 экз. Бесплатно.
Заказ № 20

Отпечатано на ротопринте ИЯФ СО АН СССР



Новосибирск

АННОТАЦИЯ

А. А. Давыдов, Г. В. Рыжов

Описана схема водородной плазменной мишени для конверсии пучка отрицательных ионов изотопов водорода в атомы. Экспериментальная величина выхода атомов равна $84 \pm 0,5\%$ при энергии ионов H^- 500 кэВ и толщине мишени $n_e L = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

В схеме генератора отрицательных ионов /1/ для поддержания материального и энергетического баланса необходимо излучать пучок H^- ионов водорода с энергией порядка 1 МэВ. Пучки атомов с такой энергией с высокой эффективностью можно получить лишь нейтронизацией предварительно ускоренных отрицательных ионов водорода. Прогресс в развитии установок отрицательных ионов водорода /2, 3/ позволяет надеяться, что в ближайшем будущем будут созданы мощные инжекторы высочайших атомов для пучков отрицательных ионов.

Ключевым элементом схемы таких инжекторов является механизм ускорения и энергетической эффективности, является облучаемый материал, в котором быстрые отрицательные ионы конвертируются в атомы. Впервые /4, 5/ в принципе удалось получить нейтральные атомы водорода с энергией до 100 кэВ, но использованные в /4, 5/ материалы были относительно дорогостоящими сложными и большой стоимости. В подобных случаях, особенно простых и дешевых, максимальный коэффициент конверсии достигается с помощью излучения и составляет 85%. Максимальная величина коэффициента конверсии предположительно может быть достигнута при большой эффективности ионизации, так в литиевой и марганцевой мишенях эта величина составляет 83-85% /5/.

На основании расчетов с использованием экспериментальных данных о сечении отрыва электронов от отрицательных ионов и атомов водорода при столкновении с электронами мо-

КОНВЕРСИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА В АТОМЫ В ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ МИШЕНИ

А. А. Иванов, Г. В. Русляков

Одним из перспективных способов нагрева плазмы в термоядерных установках с магнитным удержанием является инжекция пучков атомов изотопов водорода с энергией в сотни кэВ. В схеме реактора с двойными пробками /1/ для поддержания материального и энергетического баланса необходима инжекция пучков изотопов водорода с энергией масштаба 1 МэВ. Пучки атомов с такой энергией с высокой эффективностью можно получать лишь нейтрализацией предварительно ускоренных отрицательных ионов водорода. Прогресс в развитии источников отрицательных ионов водорода /2, 3/ позволяет надеяться, что в ближайшем будущем будут созданы мощные инжекторы высокоэнергичных атомов на основе пучков отрицательных ионов.

Неотъемлемым элементом схемы таких инжекторов, во многом определяющем их энергетическую эффективность, является обдирочная мишень, в которой быстрые отрицательные ионы конвертируются в атомы. Фотонная мишень /4/ в принципе позволяет получить коэффициент конверсии, близкий к 100%, однако, её использование в ближайшем будущем маловероятно вследствие технологических сложностей и большой стоимости. В газовых мишенях, сравнительно простых и дешевых, максимальный коэффициент конверсии достигается в мишени из паров лития и составляет 65%. Плазменные мишени по сложности и стоимости превосходят газовые, но в них может быть достигнута большая эффективность конверсии, так в литиевой и магниевой плазмах эта величина составляет 80-82% /5/.

На основании расчетов с использованием экспериментальных данных о сечениях отрыва электронов от отрицательных ионов и атомов водорода при столкновениях с электронами мож-

но ожидать, что в водородной плазменной мишени выход атомов составит 85%.

С целью проверки возможности реализации экономичной водородной плазменной мишени и её эффективности нами была разработана и экспериментально исследована схема мишени /6/, приведенная на рис.1. Струя водородной плазмы, генерируемая в источнике с термоэмиссионным катодом из LaB_6 (1), помещенным в магнитное поле, распространяется вдоль силовых линий магнитного поля, создаваемого катушками изогнутого соленоида (3). На прямолинейном участке соленоида, прилегающем к источнику плазмы, струя откачивается от сопутствующего неионизированного водорода. Другой прямолинейный участок является собственно мишенью. Катушка (5) создает встречное магнитное поле, направляющее струю в приемный объем (4), где происходит её рекомбинация и откачка. В предложенной схеме выгодно увеличивать длину прямолинейного участка плазмоведа. При этом снижается плотность, следовательно и поток плазмы, что ведет к снижению энергозатрат на генерацию плазмы и облегчает условия откачки в приемном объеме. Достаточно протяженная мишень позволяет, в принципе, избежать снижения выхода атомов из-за возбуждения частиц пучка. Поворот плазменной струи служит для вывода провзаимодействовавшего пучка из мишени.

Детальное описание экспериментальной установки и исследований генерации и транспортировки струи водородной плазмы, проведенных по этой схеме, приведено в /6/. В настоящем сообщении мы ограничимся сводкой основных результатов исследований и параметров плазменной струи, и приведем результаты проведенных нами экспериментов по конверсии пучка отрицательных ионов водорода в атомы.

Струя водородной или дейтериевой плазмы полной длиной 1,5 м и длиной мишенной части 0,8 м имела диаметр ~ 4 см. Плазма с плотностью порядка 10^{13} см $^{-3}$ и электронной температурой 5-6 эВ генерировалась при мощности разряда в источнике в десятки киловатт при длительности 1,5 мсек. Зависимость плотности плазмы в струе, прошедшей поворот, от мощности разряда близка к линейной, при $P \approx 100$ кВт, $n_e = 2,5 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$. Поворот струи с приведенными выше параметра-

ми на 90° в магнитном поле 1 кЭ, создаваемом изогнутым соленоидом, не приводил к возможной в такой конфигурации магнитного поля гидродинамической неустойчивости и потерям плазмы. Экспериментально установлено, что гидродинамическая устойчивость плазменной струи связана со стабилизирующим действием катодного торца разряда. Диффузионное расширение при транспортировке струи незначительно (много меньше диаметра струи). Степень ионизации плазмы не ниже 70%, доля молекулярных ионов не превосходит 10-15%.

Исследование эффективности конверсии в водородной плазменной мишени проводилось по экспериментальной схеме, приведенной на рис.2. Импульсный пучок ионов H^- с длительностью 0,3 мсек, энергией 30 кэВ на выходе ускорителя Ван де Граафа анализировался магнитом (1) и коллимировался диафрагмой (2) с отверстием $0,5 \pm 1$ см, установленной соосно с соленоидом плазменной мишени (4). После прохождения мишени пучок разделялся в магнитном поле изогнутого участка соленоида на три пучка: H^- , H^0 , и H^+ . Измерение всех пучков проводилось одинаковым образом. Каждый пучок пропусклся через лавсановую обдирающую пленку толщиной 3500 Å и в виде протонного пучка принимался цилиндром Фарадея. В цилиндрах Фарадея установлены сеточные электроды с прозрачностью 99,5%, имеющие отрицательный потенциал - 300 В, служащий для подавления вторичной электронной эмиссии с коллекторов и обдирающих пленок. Коэффициент преобразования всех видов ионов в протоны близок к единице, его расчетное значение при энергии частиц в 500 кэВ равно 0,999. Используемая схема регистрации пучков позволяет непосредственно измерять их токи и обойтись без процедуры калибровки детектора атомарного пучка и связанных с ней погрешностей. В каждом импульсе двухлучевым осциллографом измерялся ток на коллектор атомов - J^0 и сумма токов на коллекторы отрицательных и положительных ионов $J^- + J^+$. Благодаря одновременной калибровке обоих входов осциллографа, систематическая погрешность измерения отношения токов не могла превышать $\pm 3\%$. Соответствующая погрешность в определении коэффициента конверсии отрицательных ионов в атомы $\Phi^0 = \frac{J^0}{J^- + J^+ + J^0}$ при $\Phi^0 =$

0,85 равна $\pm 0,5\%$.

Результаты измерений зависимости выхода атомов водорода из отрицательных ионов H^- с энергией 500 кэВ от толщины плазменной мишени приведены на рис.3. Толщина плазменной мишени определялась по ослаблению пучка отрицательных ионов с использованием величины сечений, приведенных в /7,8/. При толщине мишени $n_e L = 2,1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ измеренная величина выхода атомов достигает максимального значения, равного $84 \pm 0,5\%$. Характер зависимости величины выхода атомов от толщины плазменной мишени и величины оптимальной толщины мишени и соответствующего ей выхода атомов находятся в хорошем согласии с рассчитанными по сечениям. Расчетная оптимальная толщина мишени при энергии ионов H^- в 500 кэВ составляет $2,1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и $\Phi_{\text{max}}^0 = 84,3\%$. Мы ограничились измерениями выхода атомов водорода при энергии 500 кэВ (соответствующая энергия дейтронов 1 МэВ), поскольку результаты экспериментов /5/ и расчетные данные свидетельствуют о том, что величина максимального выхода атомов практически не зависит от энергии частиц в диапазоне 0,2-1 МэВ. Совпадение экспериментально измеренной величины выхода и расчетной свидетельствует о весьма высокой степени ионизации струи плазмы, превышающей нижнюю оценку - 70%, сделанную на основании исследований, описанных в /6/. В /6/ плотность газа принималась равной плотности газа, выделяющегося при прохождении плазмы по прямолинейному участку соленоида и окружающего плазменную струю. Проведенный нами эксперимент по дополнительному импульсному напуску в соленоид облачка водорода с размерами ~15 см, локализованного в 20 см от конца мишени, показал высокие экранирующие свойства плазменной струи. Так при $n_e = 15 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и полной толщине плазменной мишени $n_e L = 1,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, при напуске водорода с $n \approx 2,7 \cdot 10^{14} \text{ мол/см}^3$ и $nL = 4 \cdot 10^{15} \text{ мол/см}^2$ реализовывалась комбинированная мишень оптимальной величины, а выход атомов составил 82,8%. Эта величина выхода соответствует следующему расчетному составу комбинированной мишени $n_e L = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, $nL = 10^{15} \text{ мол/см}^2$. Таким образом было установлено, что плазменная струя не только хорошо экранирует себя от внешнего потока неионизированного газа, но также и

эффективно откачивает его, ионизируя и вынося в приемный объем.

Достаточно высокое значение коэффициента конверсии высокэнергичных отрицательных ионов водорода в атомы, а также высокие экранирующие и откачивающие свойства, присущие исследованной схеме водородной плазменной мишени, позволяют надеяться на успешное применение ее в инжекторах высокоэнергичных атомов.

Авторы благодарят Г.И. Димова за полезные обсуждения и поддержку работы, В.Е. Чуприянова за помощь в работе с ускорителем.

Подписи к рисункам

Рис.1. Схема водородной плазменной мишени.

1. Источник плазмы.
2. Объем дифференциальной откачки.
3. Катушки соленоида.
4. Приемный объем.
5. Катушка обратного магнитного поля.

Рис.2. Схема эксперимента по конверсии пучка отрицательных ионов водорода в атомы.

1. Анализирующий магнит.
2. Коллиматор.
3. Плазменная струя.
4. Катушки соленоида.
5. Обдирающие пленки.
6. Цилиндры Фарадея.
7. Импульсный газовый клапан.

Рис.3. Зависимость выхода компонент пучка от толщины плазменной мишени.

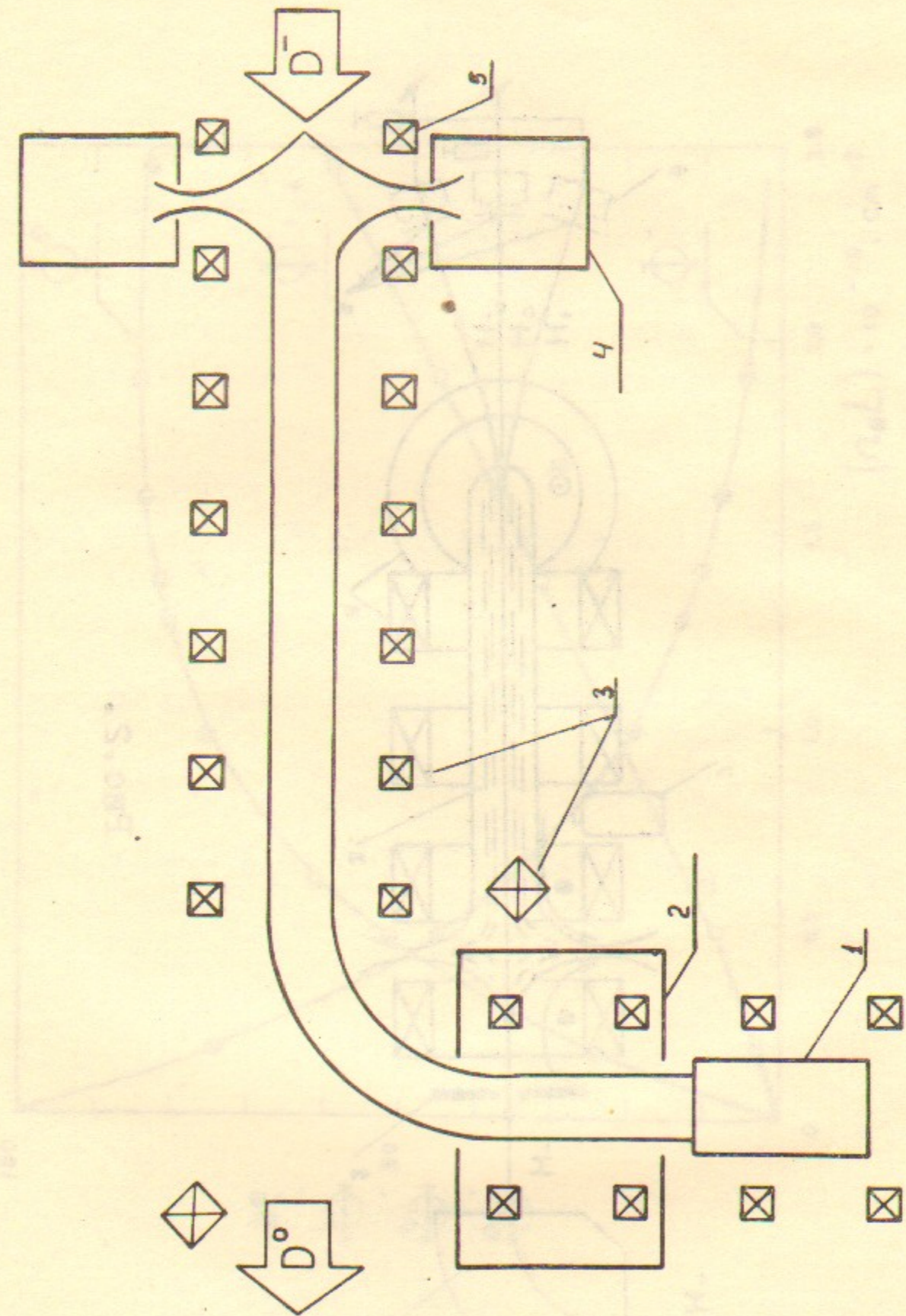


Рис. 1.

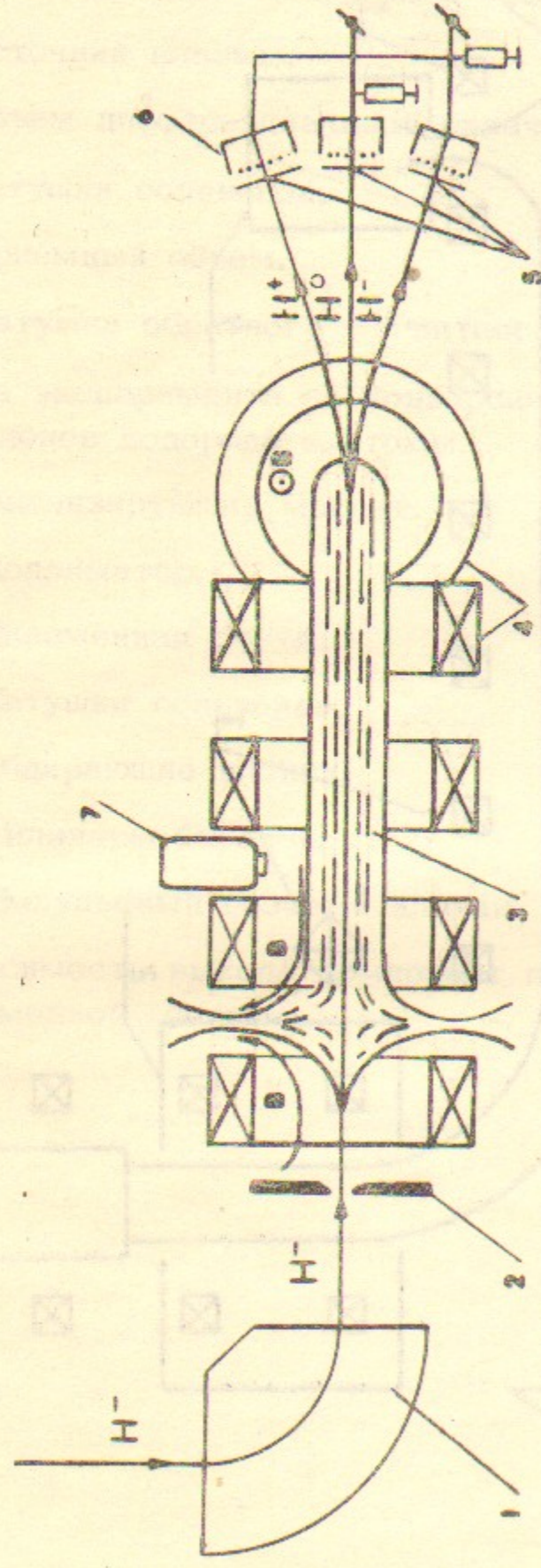


Рис. 2.

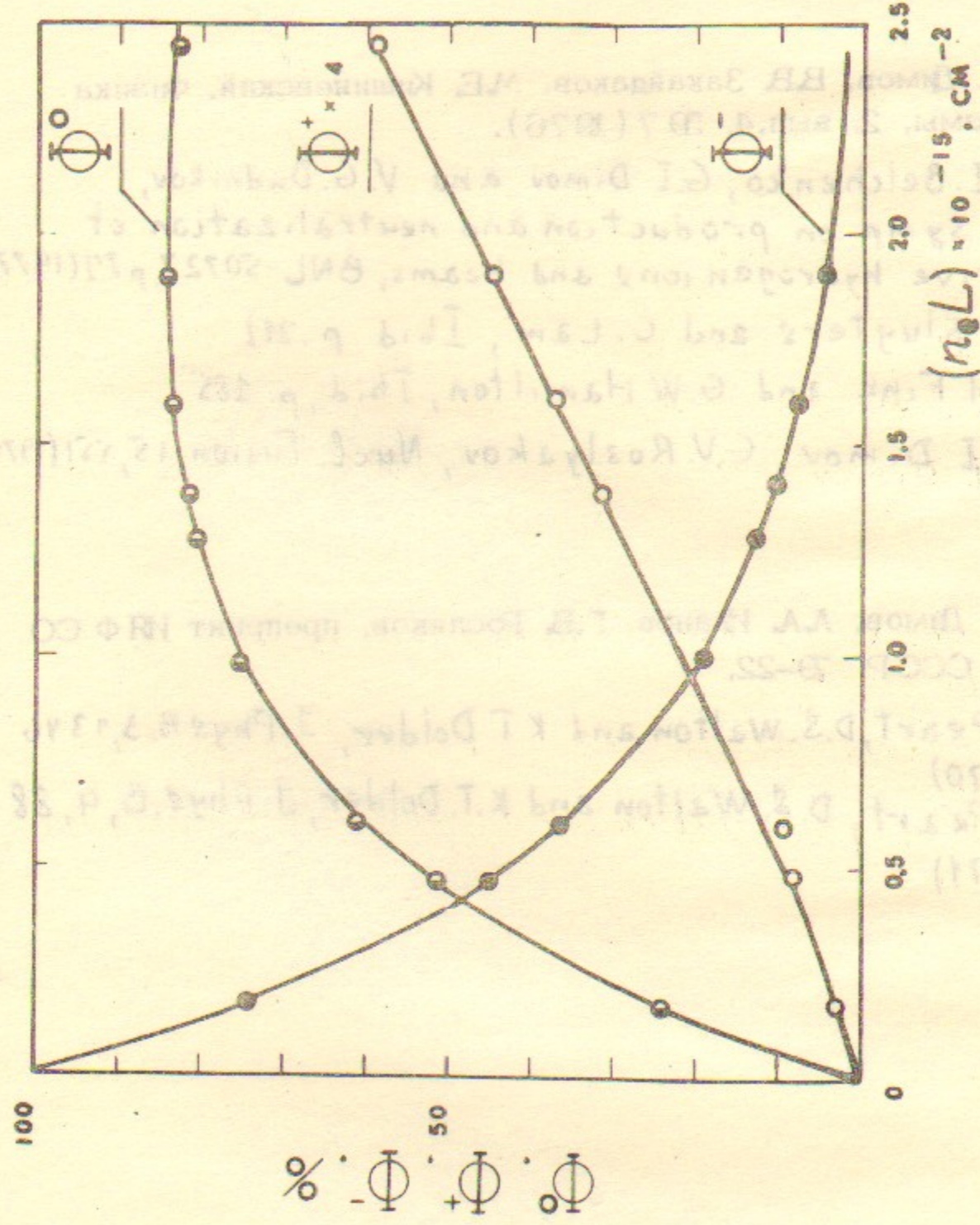


Рис. 3.

Л и т е р а т у р а

1. Г.И. Димов, В.В. Закайдаков, М.Е. Кишиневский. Физика плазмы, 2, вып.4, 397 (1976).
2. Yu I. Beichenko, G.I. Dimov and V.G. Dudnikov, Proc. Symp. on production and neutralization of negative hydrogen ions and beams, BNL-50727, p.79 (1977)
3. Th Sluyters and C. Lam, *Ibid* p.211
4. J.H. Fink and G.W. Hamilton, *Ibid*, p. 185
5. G.I. Dimov, G.V. Roslyakov, Nucl. Fusion, 15, 551 (1975)

6. Г.И. Димов, А.А. Иванов, Г.В. Русляков, препринт ИЯФ СО АН СССР 79-22,
7. B Peart, D.S. Walton and K.T. Dolder, J. Phys. B, 3, 1346 (1970)
8. B Peart, D.S. Walton and K.T. Dolder, J. Phys. B, 4, 88 (1971)