

С 345 Н

П-389

Плис Ю. А. и др.

Б1-9-7470.



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б1-9-7470

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1973

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
Лаборатория ядерных проблем

В.А.Плис, А.Л.Савенков, Л.М.Сороко

Б1-9-7470

ДИССОЦИАТОР ВОДОРОДА В ИСТОЧНИКЕ
ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ИОНОВ

с.ф. 3757

Рукопись поступила
в издательский отдел
... 1 октября 1973

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

г.Дубна, 1973 года

А Н Н О Т А Ц И Я

Дано описание диссоциатора водорода, используемого в источнике поляризованных ионов в Лаборатории ядерных проблем.

Приведены физико-технические характеристики диссоциатора и результаты экспериментов по получению пучка атомного водорода.

ВВЕДЕНИЕ

В источнике поляризованных ионов, построенном по классической схеме, последовательно осуществляются следующие процессы /1,2/ (Рис. 1): 1) диссоциация молекул водорода на атомы; 2) формирование пучка атомов с тепловыми скоростями; 3) пространственное разделение атомов водорода по спиновым состояниям электрона в неоднородном магнитном поле; 4) изменение населенности спиновых состояний с помощью индуцированных квантовых переходов в высокочастотном магнитном поле; 5) ионизация атомов электронным ударом; и, наконец, 6) инжекция поляризованных ионов в ускоритель.

В данном отчете дано подробное описание конструкции диссоциатора водорода, используемого в источнике поляризованных ионов Лаборатории ядерных проблем. Заявка на предлагаемое изобретение № 1696533/26-25 с приоритетом от 30 августа 1971 г. авторов: Е.М.Наумов, Ю.А.Плис, А.Л.Савенков, Л.М.Сороко признана изобретением решением ВНИИГЧЭ от 20 ноября 1972 г.

В отчете приведены физико-технические характеристики этого диссоциатора и результаты экспериментов по получению пучка атомного водорода.

2. ДИССОЦИАТОР.

Диссоциацию молекул водорода обычно проводят в электрическом разряде. Это - либо разряд Вуда ^{/3/}, либо дуговой разряд ^{/4/}, либо - высокочастотный безэлектродный разряд ^{/5/}. Во многих лабораториях распространение получил диссоциатор с высокочастотным разрядом. Впервые такую конструкцию диссоциатора построил Келлер ^{/6/} в 1960 г. Диссоциация водорода в этом диссоциаторе производится при давлении газа 0,1-2 тор. Разрядная трубка имеет U-образную форму со вздутиями в месте расположения электродов ёмкостной связи. Последние подсоединены к генератору высокой частоты через согласующий четырехполюсник. Чтобы разряд не мог распространиться в систему подачи газа, водород, подаваемый в область разряда, проходит через стеклянные трубки большой длины и малого внутреннего диаметра.

Такая схема диссоциатора требует стабилизации частоты генератора и поддержания расхода газа на постоянном уровне. В противном случае возникает рассогласование между импедансом высокочастотного разряда и генератором и для устранения этого рассогласования четырехполюсник приходится перестраивать с помощью переменного конденсатора.

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ был разработан, построен и испытан новый вариант диссоциатора Келлера с существенными особенностями.

Схема диссоциатора Лаборатории ядерных проблем приведена на рис. 2.

Диссоциатор состоит из стеклянной U -образной колбы (1), изготовленной из стекла пирекс, двух медных трубчатых электродов (2), сквозь которые проходят стеклянные трубки для подачи водорода в область разряда, и двухтактного автогенератора высокой частоты (3).

Автогенератор выполнен по схеме с заземленным катодом на двух тетрадах ГУ-80 и включает в себя: дроссели в цепи анода (4), конденсаторы C_a в цепи анода (5), дроссели в сеточной цепи (6), конденсаторы C_c в сеточной цепи (7) и общий экранирующий кожух (8).

Эквивалентная электрическая схема диссоциатора приведена на рис. 3. Сопротивление нагрузки Z_H подключено к точкам 1-2, а внутреннее сопротивление генератора Z_g - к точкам 5-6. Диссоциатор заключен в экранирующий кожух (8) на рис. 2, состоящий из стальной трубы, которая охватывает область разряда, и медного корпуса автогенератора. Внутри последнего расположены трубчатые электроды, одним концом соединенные с землей. Полная длина каждого электрода составляет около 1300 мм.

Высокочастотная мощность поступает в область разряда через неоднородную электрическую линию, состоящую из двух участков (Рис. 3). Участок линии 1-3, 2-4 имеет волновое сопротивление W_1 и длину l_1 , а участок 3-5, 4-6, соответственно, W_2 и l_2 . В точке 7 линия замкнута на землю. На противоположном конце линии расположена пучность напряжения. Резонансная длина λ такой четвертьволновой линии определяется уравнением

$$\frac{\lambda}{4} = l_1 + \frac{1}{2\pi/\lambda} \arcsin \left[\operatorname{tg} \frac{W_2}{W_1} \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi l_2}{\lambda} \right) \right] \quad (1)$$

В данной конструкции диссоциатора использовалась неоднородная линия, имеющая повышающий коэффициент сопротивления нагрузки к генератору ($W_1 > W_2$).

Электрическая длина линии оказывается больше геометрической из-за скачка фазы φ , определяемого соотношением

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{W_2 - W_1}{W_1 + W_2} \cdot \frac{\operatorname{tg} \frac{2\pi l_2}{\lambda}}{\operatorname{tg} \frac{2\pi l_1}{\lambda}} \quad (2)$$

Сопротивление нагрузки, которое зависит от давления газа в колбе и в свою очередь изменяет условия самовозбуждения автогенератора, задает место подключения электродов генератора к электрической линии в точках 5-6.

При известных значениях величин l_1, l_2, W_1, W_2 собственную частоту автогенератора можно определить либо графически, либо методом последовательных приближений. Однако, поскольку в силу свойств электрического разряда в газе значение рабочей частоты автогенератора не является критическим, то точный расчёт собственной частоты системы представляет интерес только тогда, когда требуется определить реактивное сопротивление нагрузки X_H по сдвигу частоты автогенератора после возникновения разряда в колбе.

Изменение собственной частоты автогенератора после поджига разряда оказалось незначительным. А именно, при давлении газа около I тора сдвиг частоты составляет $0,3 \pm 0,4$ Мгц при собственной частоте автогенератора, равной 35 Мгц.

Уровень мощности, подводимой к разряду для поддержания оптимального режима, составляет около 500 вт. Такая мощность генерируется при анодном напряжении, равном $\approx 2,5$ кв.

Совместное расположение контура автогенератора и функциональных узлов собственно диссоциатора дает следующие преимущества:

1. простоту выполнения резонансной линии и системы подачи газа в диссоциатор;
2. простоту автоматической симметризации разряда в обоих плечах U-образной колбы;
3. почти постоянный уровень мощности, подводимой к разряду, в рабочем диапазоне давлений газа и простоту защиты стеклянной колбы от перегрева.

3. АТОМНЫЙ ПУЧОК.

Атомный пучок, выходящий из диссоциатора, формируют с помощью эффузионного отверстия^{/7/}, с помощью мультиколлиматора^{/8/} или с помощью миниатюрного сопла Лавала^{/6,9/}.

В случае эффузионного источника атомов интенсивность пучка атомов, выражаемая числом атомов, вышедших за 1 сек в единственный телесный угол в направлении, составляющем угол θ с осью эффузионного отверстия, равна

$$I(\theta) = \frac{n_0 \bar{v}_0}{4\pi} \cos \theta \cdot A_0 \text{ (сек}^{-1} \cdot \text{стерад}^{-1} \text{)} \quad (3)$$

где n_0 - плотность атомов в колбе диссоциатора (см^{-3}),

\bar{v}_0 - средняя скорость атомов в диссоциаторе, находящихся при температуре T_0 ,

$$\bar{v}_0 = \sqrt{\frac{8kT_0}{\pi}} \approx 1,6 \sqrt{\frac{kT_0}{m}}$$

A_0 - площадь эффузионного отверстия.

Полный поток атомов равен

$$F = \frac{n_0 \bar{v}_0}{4} A_0 \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) справедливы при условии, если толщина стенок отверстия мала, а средняя длина свободного пробега атомов λ_0 значительно больше радиуса отверстия. Экспериментально установлено, что максимальная интенсивность атомного пучка достигается в условиях, когда

$$\tau_0 \approx \lambda_0, \text{ или}$$

$$\tau_0 \approx \frac{1}{\sqrt{2} n_0 \sigma} \quad (5)$$

где $\sigma = \pi \delta^2$, δ - газокINETический диаметр атомов. При этом интенсивность пучка вдоль оси равна

$$I_0^{\max}(0) \approx \frac{\bar{v}_0 \tau_0}{4 \sqrt{2} \pi \delta^2} = \frac{\bar{v}_0}{8 n_0 \pi^2 \delta^4} \quad (6)$$

Если эффузия происходит через канал диаметром d и длиной L и если выполнены условия: $\lambda_0 \gg d$ и $\lambda_0 \gg L$, то интенсивность пучка вдоль оси $I(0)$ по-прежнему описывается выражением (3), а полный поток атомов уменьшается в \mathcal{R} раз по сравнению с величиной (4),

где

$$\alpha = \frac{3L}{4d} \quad (L \gg d)$$

и составляет

$$F = \frac{1}{\alpha} \frac{n_0 \bar{v}_0 A_0}{4} = \frac{n_0 \bar{v}_0 A_0}{3} \frac{d}{L} \quad (7)$$

Угловая расходимость атомного пучка характеризуется углом $\theta_{1/2}$, при котором интенсивность пучка в 2 раза меньше интенсивности пучка вдоль оси. Для углового распределения $I(\theta)$, описываемого косинусоидой,

$$\theta_{1/2} = \frac{\pi}{3} \sim 1$$

Угловое распределение атомов на выходе канала характеризуется величиной

$$\theta_{1/2} \approx \frac{d}{L}$$

и при $d \ll L$ сосредоточено в узком конусе.

При некотором промежуточном давлении длина свободного пробега может стать меньше длины канала, $\lambda_0 \lesssim L$, но больше диаметра канала, $\lambda \gg d$. В этом случае соотношение (7) для полного потока остается справедливым, а интенсивность пучка вдоль оси равняется ^{/10/}

$$I(0) = \frac{1}{2^{1/4} 8 \delta} \left[\frac{3 \bar{v}_0 d F}{2\pi} \right]^{1/2} = \frac{2^{1/4} \bar{v}_0 A_0}{8\pi \delta L^{1/2}} n_0^{1/2} \quad (8)$$

т.е. растет пропорционально $n_0^{1/2}$, а не n_0 .

Полуширина углового распределения равна

$$\theta_{1/2} = \frac{2^{7/4} \delta}{1,78} \left[\frac{6F}{d \bar{v}_0} \right]^{1/2} \quad (9)$$

Аналогичные соотношения характеризуют интенсивность пучка атомов, который формируется большим числом капиллярных каналов, собранных вместе. А именно, интенсивность и полный поток атомов равны для $\lambda_0 \gg L \gg d$

$$I(0) = \frac{n_0 \bar{v}_0}{4\pi} A_0 \varepsilon \quad (10)$$

$$F = \frac{d}{3L} n_0 \bar{v}_0 A_0 \varepsilon \quad (11)$$

где ε - прозрачность мультиколлиматора.

Для мультиколлиматора, набранного из микрокапилляров, существует область постоянной плотности газа на выходе из диссоциатора. Размер этой области вдоль оси $\sim D/\theta_{1/2}$, где D - диаметр мультиколлиматора.

Рассеяние атомов на этом облаке газа ведет к снижению интенсивности пучка. Поэтому одиночный канал иногда может дать более высокую интенсивность пучка вдоль оси, чем мультиколлиматор. Здесь также существенную роль играет меньшая вероятность рекомбинации атомов на стенках, так как площадь стеклянной поверхности у одного канала меньше, чем у мультиколлиматора.

Мультиколлиматор обычно используют там, где скорость откачки газа ограничена, например, когда источник поляризованных ионов находится под высоким напряжением.

В источнике атомного пучка с миниатюрным соплом Лавала /6/ вместо эффузионного отверстия используют коническую диафрагму - сепаратор. В отличие от эффузионного отверстия, где газ как целое покоится относительно отверстия, газ, выходящий из миниатюрного сопла Лавала, перемещается относительно диафрагмы - сепаратора с высокой средней скоростью. Это приводит к тому, что при равных площадях поток газа через сепаратор оказывается больше, чем через эффузионное отверстие. А это значит, что при заданной скорости откачки размер сепаратора, от которого зависит поперечное сечение атомного пучка и расходимость траекторий атомов, можно сделать меньше, чем в случае эффузионного источника. Атомы, выходящие из сопла, приобретают большую продольную скорость, а поперечная скорость при этом уменьшается. Это приводит к самоколлимации пучка и к его монохроматизации.

Поток атомов из миниатюрного сопла равен

$$F_0 = n_0 \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma + 1}} \sqrt{\frac{kT_0}{m}} A_0 \quad (12)$$

Для атомного водорода, $\gamma = 5/3$, и поэтому

$$F_0 = 0,726 n_0 \sqrt{\frac{kT_0}{m}} A_0 \quad (13)$$

Поток атомов, прошедших через сепаратор, равен

$$F_1 = n_0 a_0 M_1 A_1 \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_1^2 \right]^{-\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\gamma - 1} \right)} \quad (14)$$

где A_1 - площадь отверстия сепаратора, M_1 - локальное

число Маха в потоке непосредственно перед сепаратором,
 $a_0 = \sqrt{\frac{\gamma k T_0}{m}}$ - скорость звука в газе.

Для атомного водорода поток атомов за сепаратором равен

$$F_1 = \frac{n_0 a_0 M_1 A_1}{\left(1 + \frac{M_1^2}{3}\right)^2} \quad (15)$$

Интенсивность атомного пучка вдоль оси на выходе сепаратора равна

$$I_1(0) = \frac{n_0 a_0 A_1}{2\pi} \cdot \frac{M_1 (3 + \gamma M_1^2)}{\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2\right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{\gamma-1}} \quad (16)$$

Для атомного водорода эта величина равна

$$I_1(0) = \frac{n_0 a_0 A_1}{2\pi} \cdot \frac{M_1 \left(3 + \frac{5}{3} M_1^2\right)}{\left(1 + \frac{M_1^2}{3}\right)^2} \quad (17)$$

4. РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЙ МАГНИТ.

Отбор состояний атомов с проекцией спина электронов $\bar{m}_j = 1/2$ производят в сильном магнитном поле при наличии в нем больших градиентов. Атом является магнитным диполем, и на него действует

сила

$$\vec{F} = - \frac{\partial W}{\partial \vec{B}} \frac{\partial \vec{B}}{\partial \vec{r}} \quad (18)$$

Обычно разделительные магниты выполнены в виде длинных магнитов, поперечное сечение которых имеет четыре или шесть, чередующихся по полярности полюсов II (Рис. 4.). Контуры полюсов

выбирают такими, чтобы зависимость абсолютного значения напряженности магнитного поля от радиуса имела вид

$$B = B_m \left(r / r_m \right)^2 \quad \text{— для шестиполосного магнита} \quad (19)$$

$$B = B_m \left(r / r_m \right) \quad \text{— для четырехполосного магнита.}$$

где B_m — напряженность поля у полюсных наконечников, а r_m — расстояние от полюсного наконечника до оси. Отклоняющая сила, действующая на нейтральный атом равна

$$\vec{F}_{(6)} = \left(\frac{2B_m}{r_m^2} \right) \mu_{эф} \vec{r} \quad \text{для шестиполосного магнита}$$

$$\vec{F}_{(4)} = \left(\frac{B_m}{r_m} \right) \mu_{эф} \frac{\vec{r}}{r} \quad \text{для четырехполосного магнита}$$

Эта сила направлена к оси магнита, если энергия состояния растет с увеличением B ($\mu_{эф} < 0$, $m_j = 1/2$), и направлена в сторону от оси магнита, если энергия состояния уменьшается с ростом B ($\mu_{эф} > 0$, $m_j = -1/2$).

Такой протяженный магнит пропускает только те атомы, которые находятся в состоянии с $m_j = 1/2$. Эффективность разделения атомов в состоянии с $m_j = 1/2$ от атомов в состоянии с $m_j = -1/2$ равна 95% при достаточно большой длине магнита.

Шестиполосный разделительный магнит обладает свойствами собирающей линзы, поэтому на его выходе образуется изображение источника атомов. Однако разброс атомов по скоростям приводит к сильным хроматическим aberrациям. Профилирование магнита путем изменения расстояния r_m от полюсного наконечника до оси вдоль оси магнита приводит к увеличению телесного угла захвата.

Именно такая конструкция шестиполосного магнита была принята в Лаборатории ядерных проблем. Радиус r_m увеличивался с $r_m^{вх} = 1,5$ мм до $r_m^{вых} = 6$ мм на участке магнита $l_1 = 287$ мм, а на остальном участке $l_2 = 257$ мм ($l_1 + l_2 = 544$ мм) оставался неизменным, $r_m = 6$ мм. Катушки возбуждения были изготовлены из медной трубки наружным диаметром 8 мм и внутренним диаметром 6 мм. Число витков - 6. Изоляция - тефлоновая лента. Три секции катушек возбуждения соединены параллельно для входа охлаждающей воды и последовательно - для электрического тока. Ток возбуждения, равный 400 а, поступал от мотор-генератора 500 ампер, 60 вольт, 30 квт.

В качестве материала для полюсов магнита использовалась сталь-3. Насыщение поля наступало при токе возбуждения

$i_{возб.} \approx 200$ ампер. При этом $B_m = 6000$ гаусс для $r_m = 6$ мм на выходном конце магнита.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА.

Установка состояла из следующих узлов: 1) системы очистки и подачи водорода; 2) диссоциатора с автогенератором; 3) системы формирования атомного пучка; 4) шестиполосного разделительного магнита; 5) системы измерения интенсивности пучка атомов на выходе разделительного магнита; 6) системы фотографирования профиля пучка атомов; 7) системы измерения состава пучка по массам; 8) системы раздельной вакуумной откачки всех узлов установки.

Схема очистки и подачи водорода в диссоциатор приведена на рис. 5. Для очистки от примесей газообразный водород про-

пускался через ловушку с активированным углем 9, погруженную в сосуд Дюара с жидким азотом. Активированный уголь сильно поглощал также сам водород. Поэтому очистка газа велась порциями через редуктор II из баллона IO в баллон 8. Только после такой очистки электрический разряд приобретал характерный ярко-малиновый цвет. Давление в баллоне 7, измеряемое механическим мановакууметром 4 поддерживалось на уровне I атмосферы. Через игольчатый вентиль 6 водород поступал далее в объем 3, давление в котором измерялось с помощью механического мановакууметра 4 и радиационного манометра 5 типа ВР-3. Далее через стеклянный пористый фильтр 2 водород поступал в диссоциатор I.

Схема диссоциатора дана на рис. 6. Диаметр горловины сопла Лавалья равнялся в области испытанных значений от 0,9 мм до 3 мм. Поверхность колбы диссоциатора и трубки обрабатывалась 30%-ным раствором плавиковой кислоты или концентрированной серной кислотой, тщательно промывалась дистиллированной водой и затем активировалась 2%-ным раствором гетрабората калия.

Были испытаны также мультиколлиматор диаметром 3 мм со стеклянными каналами диаметром 30 мкм и длиной 300 мкм. Коэффициент прозрачности составлял 0,8. Интенсивность атомного пучка была меньше, чем от сопла Лавалья.

Схема автогенератора, возбуждающего высокочастотный разряд в диссоциаторе, приведена на рис. 7. Типичный рабочий режим автогенератора: анодное напряжение $U_a = 2,5$ кв, анодный ток $J_a = 0,7$ а, сеточный ток $J_c = 15 \text{ м}а$. Лампы автогенератора,

также, как и сама колба диссоциатора, охлаждались сжатым воздухом.

Система формирования атомного пучка состояла из стеклянного сопла, сепаратора и коллимирующей диафрагмы перед разделительным магнитом /12/. Сменяемая центральная часть сепаратора была изготовлена из углеродистой стали и закалена. Края конусов этой части были остро заточены. Сепаратор находился на расстоянии 115 мм от начала разделительного магнита.

Диаметры отверстий сепаратора и коллиматора изменялись в пределах от 1 мм до 3 мм. Расстояние между соплом и сепаратором изменялось в пределах от 3 мм до 13 мм. Расстояние между сепаратором и коллиматором равнялось 25 мм или 45 мм.

Система измерений интенсивности пучка атомов располагалась на выходе разделительного магнита и состояла из компрессионной дюралевой трубки, соединенной с ионизационной манометрической лампой ЛМ-2 через стеклянную трубку, шлиф и азотную ловушку. Длина компрессионной трубки равнялась 80 мм и внутренний диаметр 10 мм. Калибровочный коэффициент компрессионной трубки был рассчитан по формуле Кнудсена /17/, а также был найден экспериментально по величине потока молекул водорода из эффузионного отверстия. Предполагая, что все атомы, попавшие в ловушку, рекомбинируют на металлической поверхности пластины, мы нашли, что калибровочный коэффициент, связывающий показания вакуумметра с интенсивностью пучка атомов водорода, равен $8 \cdot 10^{20}$ атомов/сек. (+ 20%).

Система наблюдения профиля поперечного сечения пучка атомов водорода располагалась за разделительным магнитом и состояла

из слоя окиси молибдена MoO_3 , нанесенного на стеклянную пластину. В месте попадания атомов водорода слой окрашивался в синий цвет благодаря реакции восстановления. Порог визуального наблюдения формы пучка атомов таким методом равен $6 \cdot 10^{15}$ атомов/см².

Анализ состава пучка по массам производился с помощью масс-спектрометра МСХ-3 по времени пролета (хронотрон). Показатели прибора дают парциальные давления газов в области ионизации. Разрешающая способность этого спектрометра равна 20 и позволяет легко разделить **атомарный и молекулярный водород**. Типичная осциллограмма спектра парциальных давлений приведена на рис. 8. Во время измерений состава пучке по массам датчик хронотрона располагался непосредственно после коллимирующей диафрагмы в отсутствие разделительного магнита.

Система отдельной вакуумной откачки включала механический двухроторный насос ДВН-500 с быстротой откачки до 500 л/сек, который откачивал область сопла, вакуумный агрегат ВА-5-4 с быстротой откачки по воздуху 2500 л/сек, - для откачки области сепаратора и вакуумного агрегата ВА-8-4 с азотной ловушкой и быстротой откачки по воздуху 2500 л/сек - для откачки области разделительного магнита.

Диффузионные вакуумные насосы заливались силиконовым маслом, слабо подверженным действию атомного водорода.

В рабочих условиях **давление** в области сопла составляло до 10^{-2} тор, в области сепаратора - до 10^{-4} тор, а в области разделительного магнита - $5 \cdot 10^{-6}$ тор.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.

Типичная кривая зависимости интенсивности пучка атомов на выходе разделительного магнита от давления газа в диссоциаторе приведена на рис. 9. Диаметр сопла равнялся 0,9 мм, диаметр сепаратора 1,1 мм, диаметр коллиматора 1,1 мм, расстояние от сопла до сепаратора равнялось 3 мм, а от сепаратора до коллиматора - 25 мм. Видно, что максимальная интенсивность пучка атомов достигается при давлении в диссоциаторе около 2 тор. Спад при более высоких давлениях обусловлен ограниченной скоростью откачки области сопла, уменьшением степени диссоциации при больших давлениях, и ограниченной мощностью высокочастотного автогенератора.

На рис. 10 дана фотография восстановленной области слоя окиси молибдена, подвергнутой действию атомов водорода в течение 5 минутной экспозиции на расстоянии 20 см от конца разделительного магнита. Видно, что пучок атомов имеет хорошо очерченный профиль, вписывающийся в окружность диаметром 10 мм.

Для измерения расходимости атомного пучка произведена засветка молибденового слоя на различных расстояниях от разделительного магнита. Величина расходимости оказалась равной 10^{-2} радиана.

Для нахождения оптимальных условий работы диссоциатора была проведена серия измерений состава пучка по массам после коллиматора при различных давлениях газа в диссоциаторе и при различных уровнях мощности автогенератора. Степень диссоциации α определялась формулой

$$\alpha = \frac{H_2(\text{БЕЗ РАЗРЯДА}) - H_2(\text{с разрядом})}{H_2(\text{без разряда})} \quad (21)$$

Здесь H_2 (без разряда) и H_2 (с разрядом) - высоты пиков на осциллограмме молекулярного водорода в отсутствие, и, соответственно, с разрядом в диссоциаторе.

На рис. II приведены измеренные значения α , а также высоты пиков атомного и молекулярного водорода при различных давлениях газа в диссоциаторе. Видно, что при давлении газа около 0,8 тор степень диссоциации составляет около 50%.

7. ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ АТОМНОГО ПУЧКА.

А. Эффузионное отверстие. Длина свободного пробега λ_0 атомов водорода связана с давлением p_0 при температуре $T_0 = 300^\circ\text{K}$ соотношением ^{16/}

$$\lambda_0 p_0 = 1,54 \cdot 10^{-2} \text{ тор.см.} \quad (22)$$

Оптимальное давление газа в диссоциаторе с эффузионным отверстием диаметром 0,1 см равно около 0,15 тор. В этих условиях полный поток атомов равен $\Gamma = 2,4 \cdot 10^{18} \text{ сек}^{-1}$, а расход газа $0,037 \frac{\text{л} \cdot \text{тор}}{\text{сек}} = 0,044 \text{ см}^3/\text{сек}$ при нормальных условиях. Требуемая скорость откачки равна 370 л/сек при давлении в отсеке $\sim 10^{-4}$ тор. Интенсивность пучка атомов равна

$\Gamma(0) = 7,6 \cdot 10^{17} \text{ сек}^{-1} \text{ стерад}^{-1}$. Акseptанс шестиполосного магни-

та при $B_m = 6 \cdot 10^3$ гауса равен $|2|$

$$\bar{\Omega} = \frac{2}{3} \pi \alpha_0^2 = 1,6 \cdot 10^{-3}$$

Интенсивность пучка поляризованных атомов равна

$$F_{\text{поляри}} = \frac{1}{2} I(0) \bar{\Omega} = 6 \cdot 10^{14} \text{ сек}^{-1} \quad (23)$$

Б. Мультиколлиматор. Выполнение условия $\lambda_0 = L$ при диаметре канала $d = 30$ мкм и длине $L = 300$ мкм достигается при $p_0 = 0,5$ тор. Если полный диаметр мультиколлиматора равен $D = 2$ мм, а коэффициент прозрачности $\epsilon = 0,8$, то полная интенсивность пучка атомов при $p_0 = 0,5$ тор равна $F = 3,46 \cdot 10^{18} \text{ сек}^{-1}$, а расход газа $0,054 \frac{\text{л. тор}}{\text{сек}} \approx 0,64 \text{ см}^3/\text{сек}$. Скорость откачки при давлении в отсеке 10^{-4} тор. равна 540 л/сек. Интенсивность пучка при той же скорости откачки, что и для эффузионного источника атомов равна

$$I(0) = 9 \cdot 10^{18} \text{ сек}^{-1} \text{ стерад}^{-1}$$

т.е. в 12 раз больше, чем для эффузионного отверстия. Интенсивность пучка поляризованных атомов равна

$$F_{\text{поляри}} = 7,2 \cdot 10^{15} \text{ сек}^{-1}$$

В. Сопло Лавала. Пусть диаметр отверстия сопла Лавала равен $d_0 = 1$ мм, а давление в диссоциаторе $p_0 = 2$ тор. Согласно (13) находим полный поток атомов $F_0 = 5,8 \cdot 10^{19} \text{ сек}^{-1}$, а расход газа $0,9 \frac{\text{л. тор}}{\text{сек}} = 1,1 \frac{\text{см}^3}{\text{сек}}$. Для поддержания давления в области сопла около 10^{-2} тор требуемая скорость откачки равна 90 л/сек. При числе Маха $M_1 = 3$ поток атомов в область сепаратора через

отверстие диаметром $d_1 = 1$ мм равно $\bar{F}_1 = 1,9 \cdot 10^{19} \text{сек}^{-1}$ или $0,3 \frac{\text{л.тор}}{\text{сек}}$. Для поддержания давления в области сепаратора около 10^{-4} тор, требуемая скорость откачки равна 3000 л/сек. Интенсивность пучка атомов после сепаратора равна $I_1(0) = 5,5 \cdot 10^{19} \text{сек}^{-1} \text{стерад}^{-1}$.

После выхода из сопла Лавали и входа в область сепаратора скорость атомов становится выше тепловой и составляет $3 \cdot 10^5$ см/сек, а это приводит к уменьшению телесного угла захвата с $1,6 \cdot 10^{-3}$ стерад до $1,4 \cdot 10^{-3}$ стерад.

Расчетное значение интенсивности пучка поляризованных атомов водорода равно

$$F_{\text{пол}} = 5,5 \cdot 10^{16} \text{сек}^{-1} \quad (25)$$

Видно, что отношения интенсивностей пучка поляризованных атомов водорода для всех трех систем формирования атомного пучка относятся, как

$$1 : 12 : 92$$

соответственно, для эффузионного отверстия, мультиколлиматора и сопла Лавали.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

1. Разработана и построена новая конструкция диссоциатора атомов водорода, содержащая U-образную колбу из стекла пирекс, высокочастотный автогенератор, электрическую линию передачи энергии в разряд и систему подачи газа, отличающаяся тем, что с целью повышения коэффициента полезного действия системы и стабильности работы автогенератор выполнен двухтактным и

нагружен двумя отрезками четвертьволновой линии, которые представляют собой плечи U-образной колбы.

2. Проведены эксперименты с этим диссоциатором и измерены основные параметры.

3. Достигнутая степень диссоциации атомов составляет около 0,5 при давлении газа 0,8 тор.

4. Интенсивность атомного пучка на входе разделительного магнита составляет $1,5 \cdot 10^{15}$ ат/сек. Это значение ниже расчётных оценок. Расхождение между расчётом и опытом связано с особенностями вакуумной системы, именно, с ограниченной скоростью откачки в области между диссоциатором и сепаратором.

Тим

Мороз

Савин

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Haerberli. Ann.Rev. Nucl.Sci., 17, 373(1967).
2. Ю.А.Плис, Л.М.Сороко, УФН, 107, 281 (1972).
3. R.W.Wood. Proc.Roy.Soc., A97, 455 (1920).
4. G.Clausnitzer. Nucl.Instr.Meth., 23, 309 (1963).
5. G.Francis. Proc.Phys.Soc., B68, 137 (1955).
6. R.L.Keller et al. Rept. CERN , 60-2, Geneva,1960.
7. Н.Рамзей. Молекулярные пучки, М.,ИЛ,1960.гл. 2+3.

8. G.H.Stafford et al. Nucl.Instr.Meth., 15,146 (1962).
9. A.Kantrowitz, J.Grey. Rev.Sci.Instr., 22,328(1951).
10. J.A.Giordmaine, T.C.Wang. J.Appl.Phys. 31, 463 (1960).
11. H.Friedburg, W.Paul. Naturwiss., 38,159(1951).
12. Ду Сюэ-жень и др., ПТЭ, №6,104 (1964).

13. G.Clausnitzer. Ann.Prog.Rep., 1959, Minnesota, p.62.

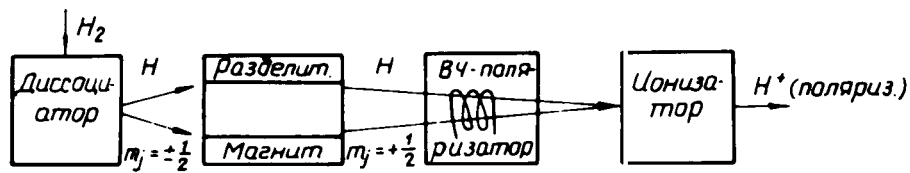


Рис. 1. Схема источника поляризованных протонов, построенная по методу атомного пучка.

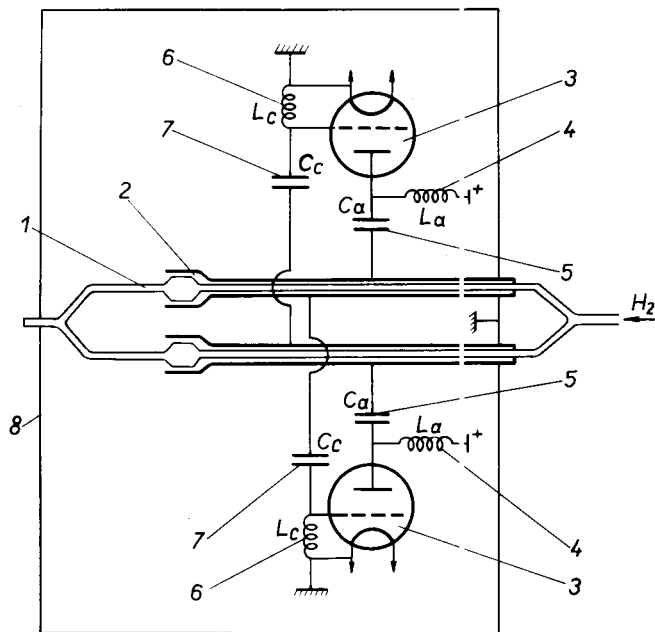


Рис. 2. Схема диссоциатора.

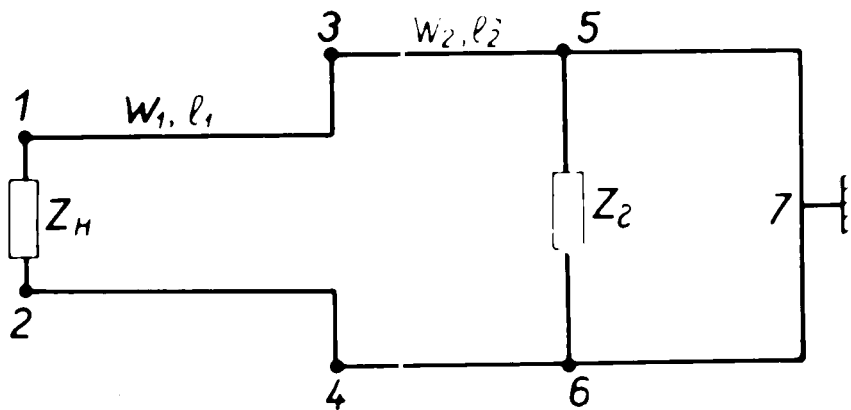


Рис 2

Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема диссоциатора.

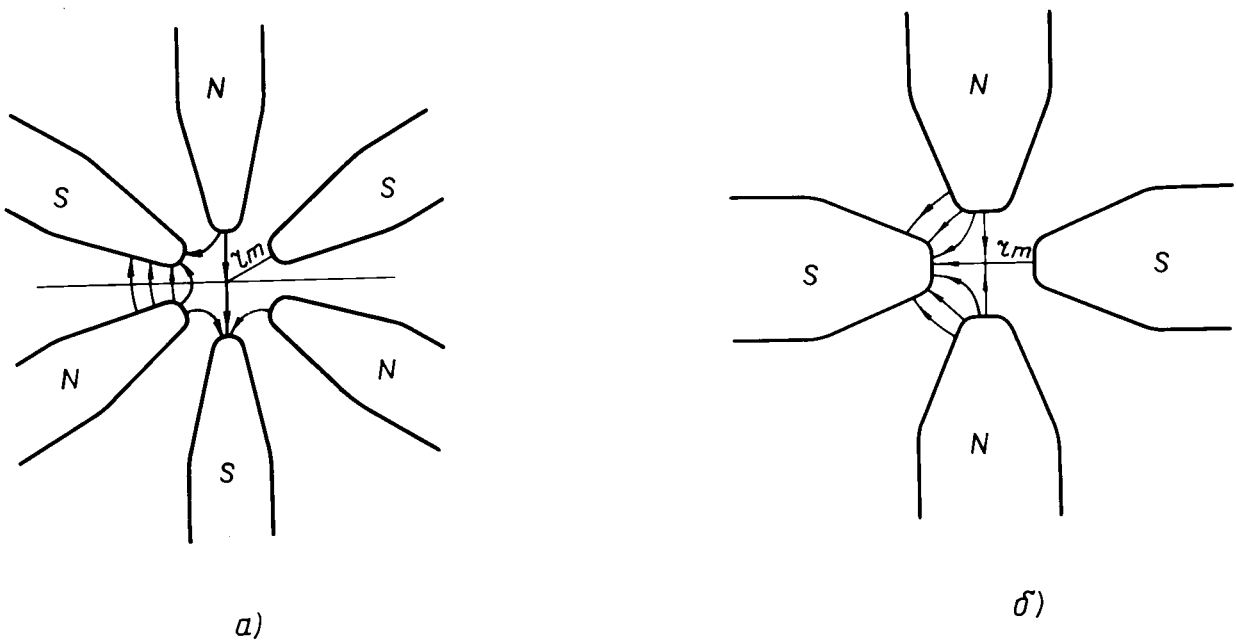


Рис. 4. Поперечное сечение шестипольного (а) и четырехпольного (б) разделительных магнитов и конфигурация силовых линий магнитного поля.

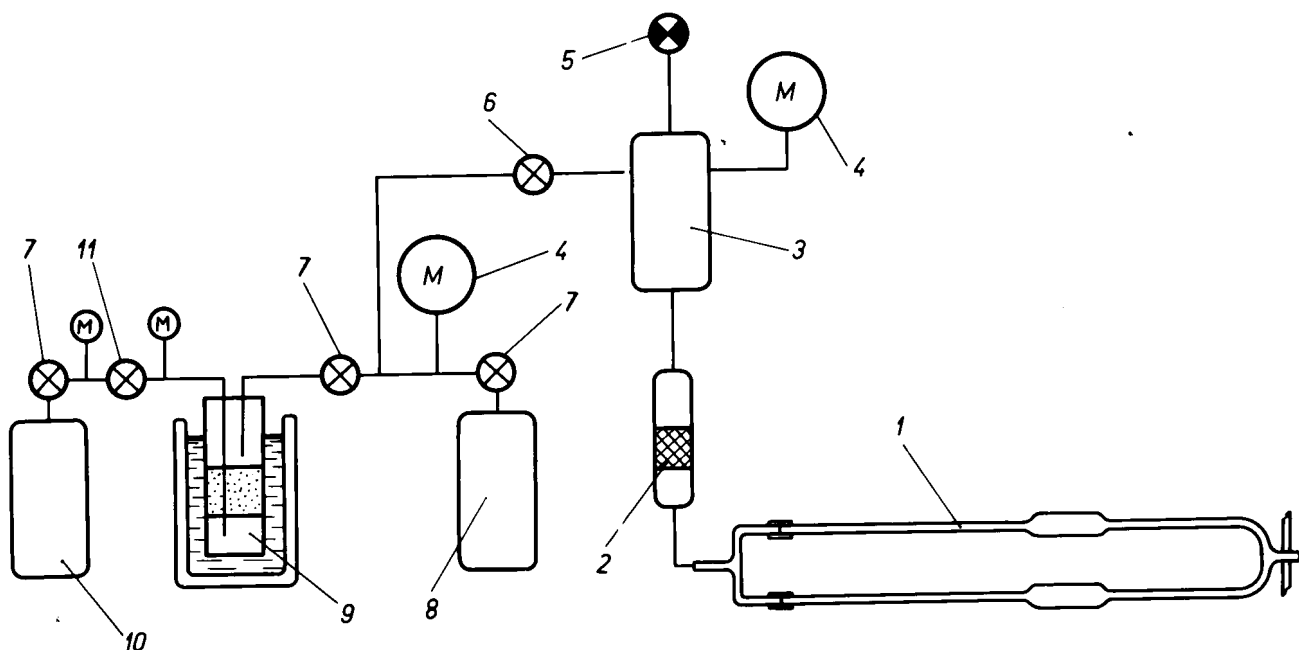


Рис. 5. Схема очистки газа и подачи водорода в диссоциатор: I - диссоциатор, 2 - стеклянный пористый фильтр, 3 - объём с очищенным водородом при давлении несколько тор, 4 - механические мановакуумметры, 5 - радиационный манометр ВР-3, 6 - игольчатый вентиль, 7 - запорные вентили, 8 - баллон I атм, 9 - ловушка с активированным углем, 10 - баллон на 5 и при давлении несколько атмосфер, II - редуктор.

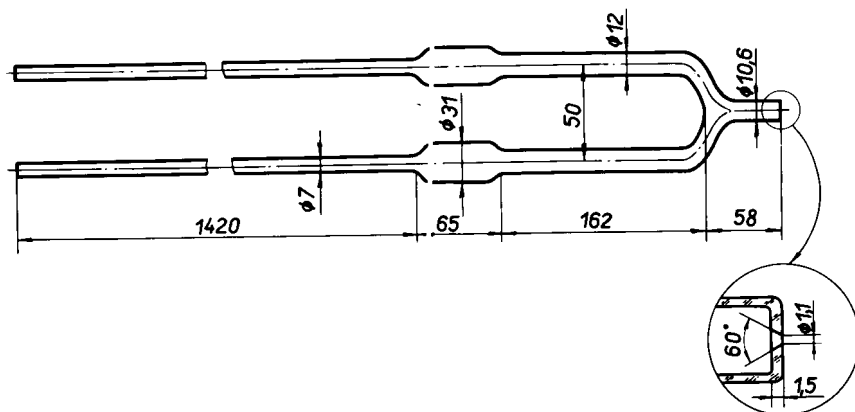


Рис. 6. Схематический разрез колбы диссоциатора.

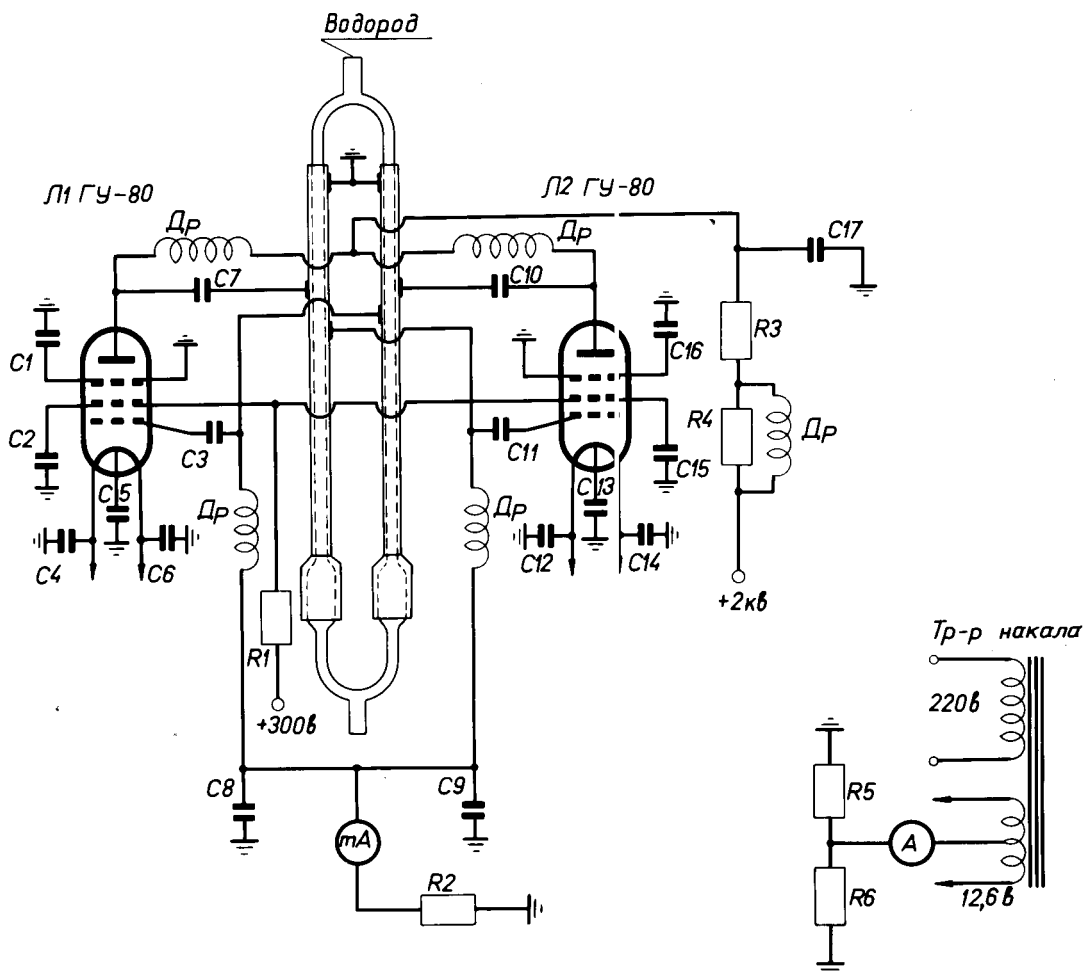


Рис. 7. Принципиальная схема автогенератора диссоциатора.

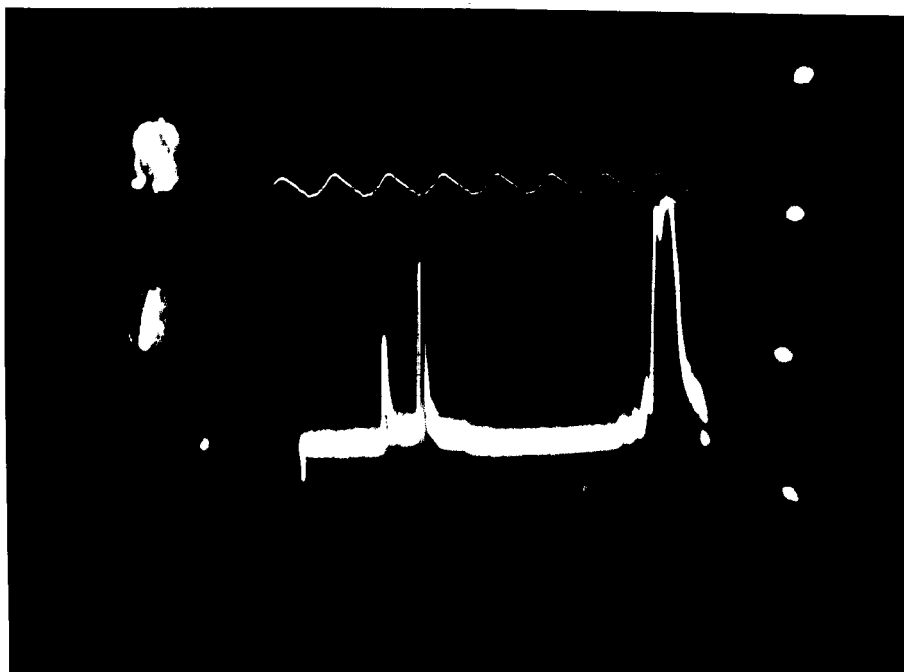


Рис. 8. Осциллограмме спектра парциальных давлений, полученного на масс-спектрометре МСХ-3. Первые два пика H_1 и H_2 , левый пик - H_1 , правый пик - H_2 .

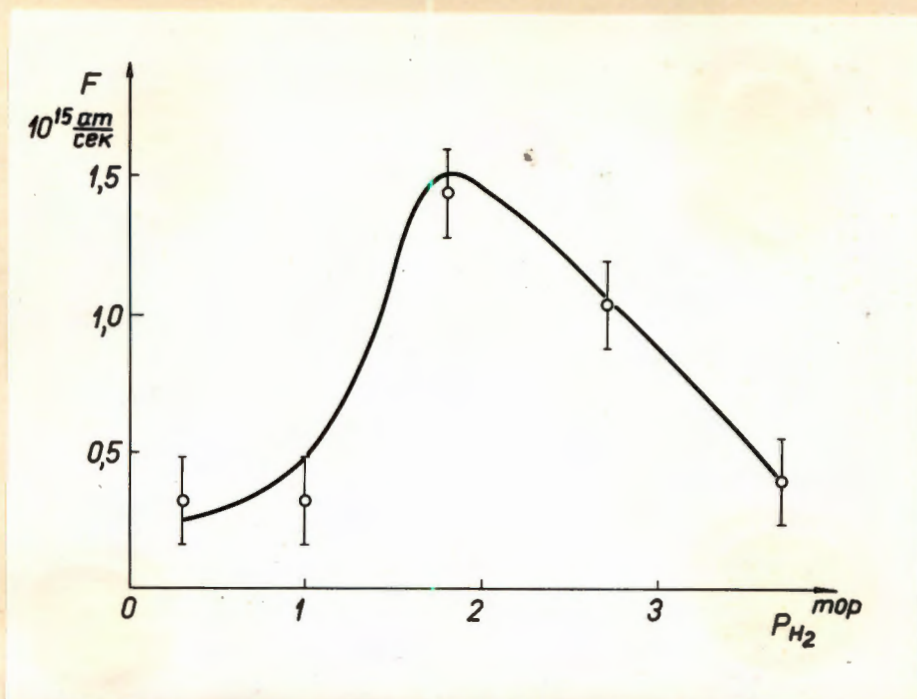


Рис. 9. Зависимость потока поляризованных атомов от давления газа в диссоциаторе.

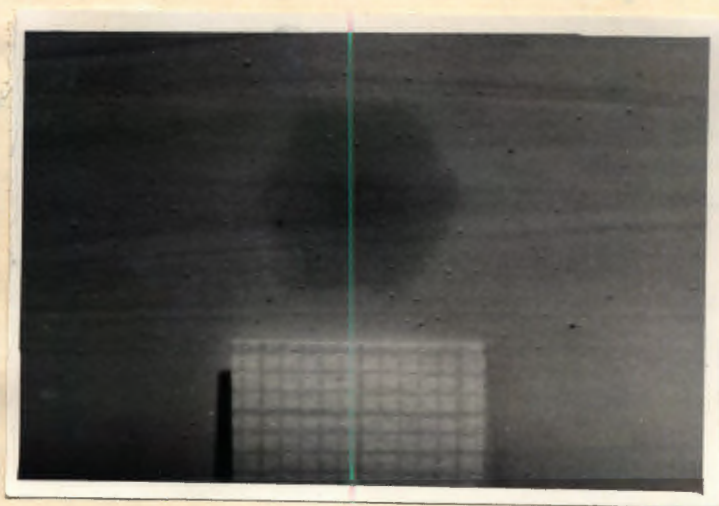


Рис. 10. Автограф атомного пучка на выходе разделительного шестипольного магнита.

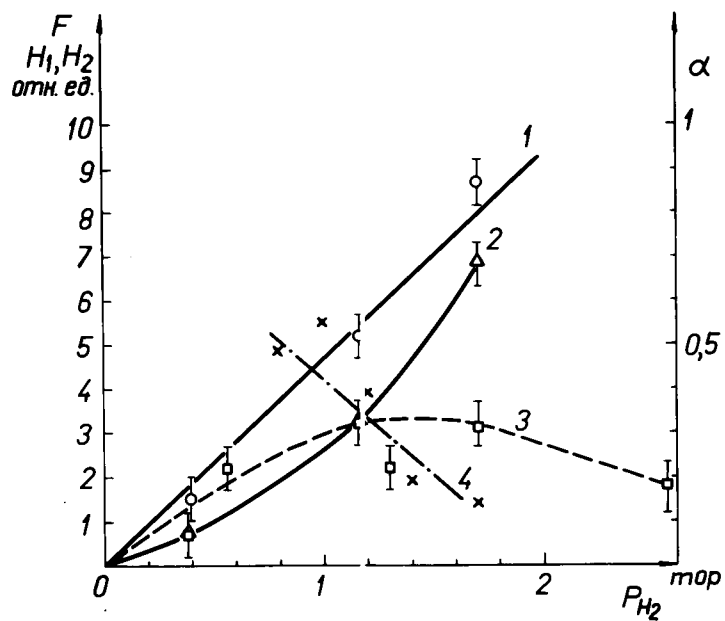


Рис. II. Значение амплитуды пиков в спектре парциальных давлений:
 (1) - пик H_2 без разряда, (2) - пик H_2 с разрядом,
 (3) - пик H_1 с разрядом, (4) - степень диссоциации;
 при разных давлениях газа в диссоциаторе водорода.