

С 345Н

Б1-9-81-805

1033/82



Максимов Ю.В. и др.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б1-9-81-805

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1981

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория ядерных проблем

Б1-9-81-805

Ю.В.Максимов, Ю.А.Плис, Е.И.Розанов, А.С.Сергунин, Л.М.Сороко

ИССЛЕДОВАНИЯ НА МАКЕТЕ ИСТОЧНИКА ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПРОТОНОВ

Будущее
в объединении
18.12.81

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

Дубна, 1981 г.

Аннотация

В работе содержится описание результатов **разработки** и исследования эксплуатационных характеристик макета источника поляризованных протонов для установки "Ф". Основное внимание уделено тракту атомного пучка. В результате введения водяного охлаждения диссоциатора и охлаждения жидким азотом формирова-теля получен поток поляризованных атомов $3,2 \cdot 10^{16}$ атомов/с. Ток поляризованных протонов достигает 15 мкА с поляризацией более 90%.

Известно, что получение первично-поляризованных пучков на ускорителях существенно расширяет возможности физического эксперимента. Установка источника поляризованных протонов (ИПП) на фазотроне с пространственной вариацией магнитного поля (установка "Ф") позволит получить интенсивный монохроматический поляризованный протонный пучок с реверсируемой поляризацией в условиях низкого фона.

В данной работе сообщается о результатах исследований на макете ИПП и обсуждаются возможности увеличения интенсивности поляризованного протонного пучка.

I. Установка

Диссоциатор

В ИПП атомы водорода образуются при диссоциации H_2 в высокочастотном газовом разряде, возбуждаемом в стеклянной колбе. Ранее^{/1/} была описана конструкция диссоциатора с рабочей частотой ВЧ колебаний 35 МГц. Однако известно^{/2/}, что наиболее эффективное использование ВЧ мощности в разряде (увеличение плотности плазмы) имеет место, когда частота столкновений электронов с молекулами $\nu_{ст}$ равна частоте колебаний $\nu_{вч}$, при условии если размеры разрядной колбы велики по сравнению со средней длиной свободного пробега электронов λ_e (для $p = 3$ торр и $T = 300$ К $\nu_{ст} \cdot 10^9 \text{с}^{-1}$ и $\lambda_e \approx 0,2$ см). В противном случае большая часть ВЧ мощности идет на нагрев газа и стенок разрядной колбы. Исходя из этих соображений, была разработана новая конструкция диссоциатора на рабочей частоте 150 МГц.

Мощность в разряд поступает через спиральный резонатор^{/3,4/} (рис. I), имеющий внутренний диаметр 80 мм и длину по внутреннему

размеру 110 мм. Резонатор изготовлен из меди и отполирован внутри.

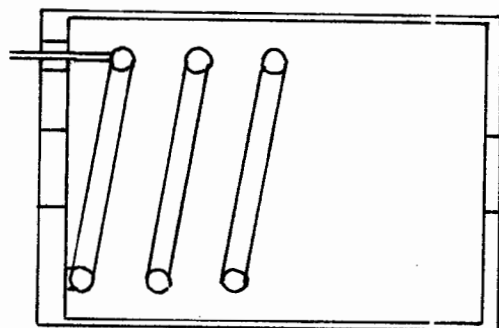


Рис. 1. Спиральный резонатор диссоциатора.

Спиральная катушка имеет внутренний диаметр 52 мм, ее три витка с шагом 20 мм сделаны из медного стержня диаметром 6 мм. Один конец катушки припаян к корпусу, а другой свободен. Место подсоединения подводимой мощности находится экспериментально (примерно один виток от заземленного конца).

Спиральный резонатор соединяется с автогенератором отрезком коаксиальной линии (кабель РК-19). Генератор (рис. 2) выполнен на лампах ГУ-34Б.

Анодное напряжение поступает на генератор от нестабилизированного выпрямителя 2,5 кВ х 3 А, экранные сетки ламп питаются выпрямителем УИП-1. Аноды ламп охлаждаются потоком воздуха от центробежного вентилятора 5ЦС-48 с производительностью 480 м³/час, ножки ламп охлаждаются сжатым воздухом от компрессора 0-38 М с наибольшим рабочим давлением 7 атм.

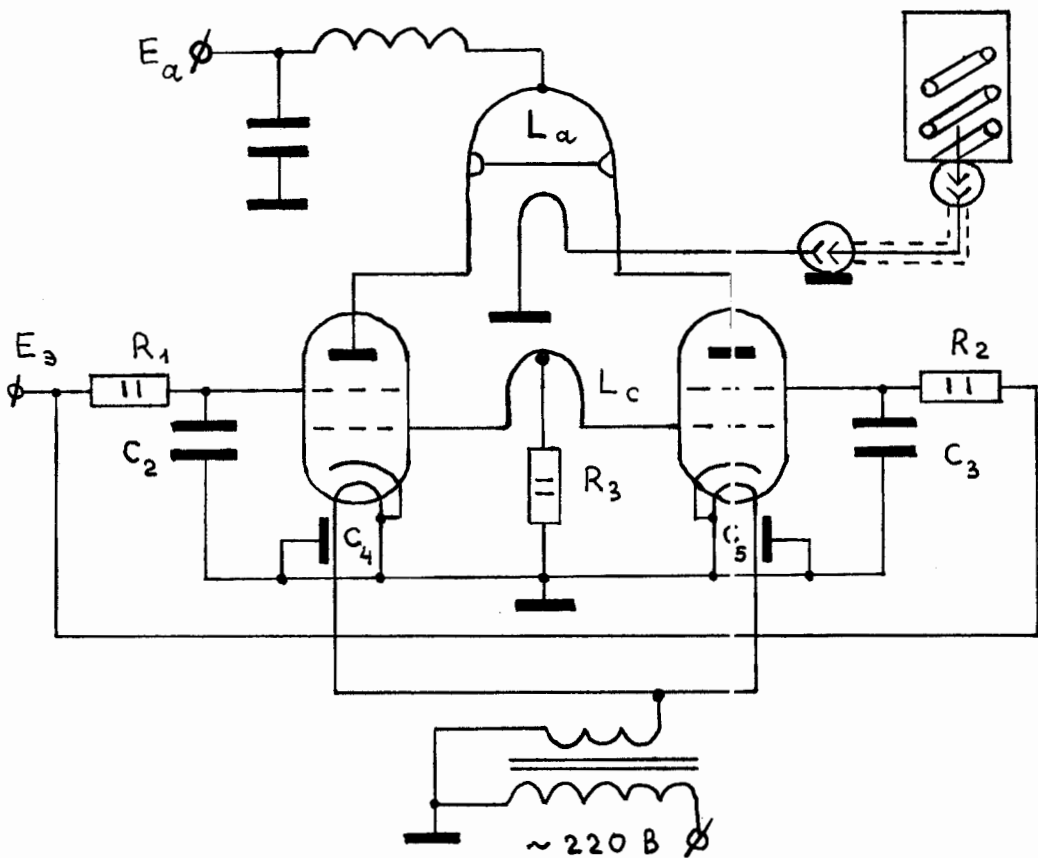


Рис. 2. ВЧ генератор диссоциатора: $L_a = 0,07 \text{ мкГн}$,
 $L_c = 0,25 \text{ мкГн}$, $C_1 = 1500 \text{ пФ}$ (10 кВ), $C_2 = C_3 = 2200 \text{ пФ}$ (10 кВ),
 $R_1 = R_2 = 1 \text{ кОм}$, $R_3 = 2 \text{ кОм}$, $C_4 = C_5 = 15000 \text{ пФ}$.

Разрядная колба, изготовленная из стекла пирекс, была выполнена в двух вариантах: для воздушного охлаждения вышеупомянутым компрессором (рис. 3 а) и с рубашкой водяного охлаждения (рис. 3 б). Был также испытан и оказался наиболее эффективным режим работы колбы I, типа изображенной на рис. 3 а, с охлаждением утолщенной части воздухом, а участка перед эффузором водой с помощью герметизированной ванны 2 (рис. 4).

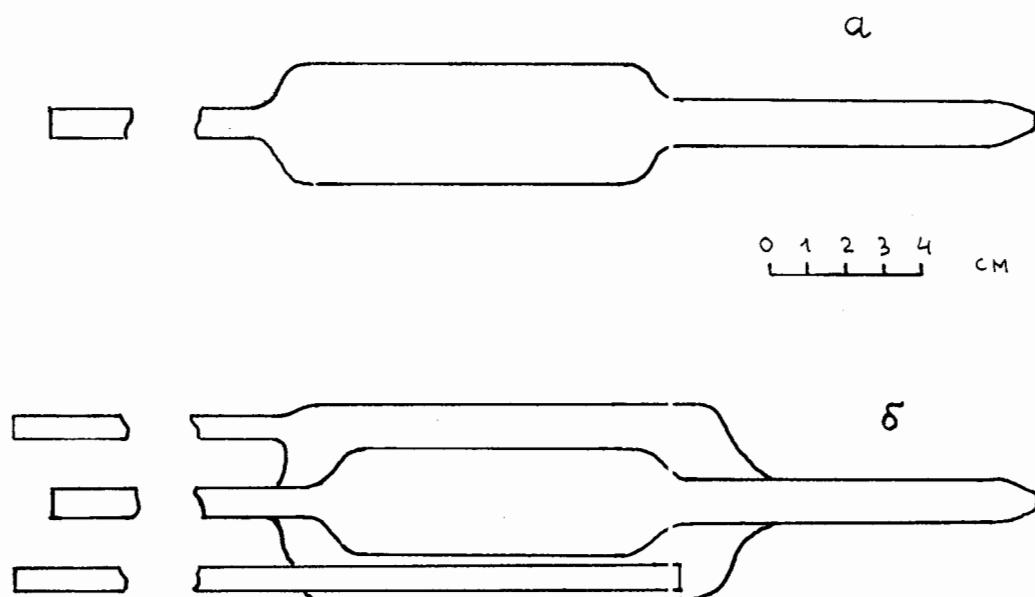


Рис. 3. Разрядная колба

Формирователь атомного пучка

В экспериментах были испытаны 2 типа эффузоров: один - в виде сопла с одной только сходящейся частью и диаметром горловины $d_c = 1 \div 2,5$ мм, другой тип - канал длиной ≈ 7 мм и диаметром $\approx 2,5$ мм. При равных расходах H_2 достигаются одинаковые потоки поляризованных атомов с каждым из эффузоров. Разрядная колба обрабатывалась внутри стопроцентным раствором плавиковой кислоты в течение нескольких минут, а затем тщательно промывалась дистиллированной водой.

Скиммер 3 (рис. 4) имел диаметр ≈ 3 мм и высоту 4 мм, угол раствора внешнего конуса - 70° , внутреннего - 50° . Расстояние от эффузора до скиммера могло регулироваться при перемещении трубы, в которой укреплен разрядная колба. На расстоянии $(20 \div 75)$ мм от

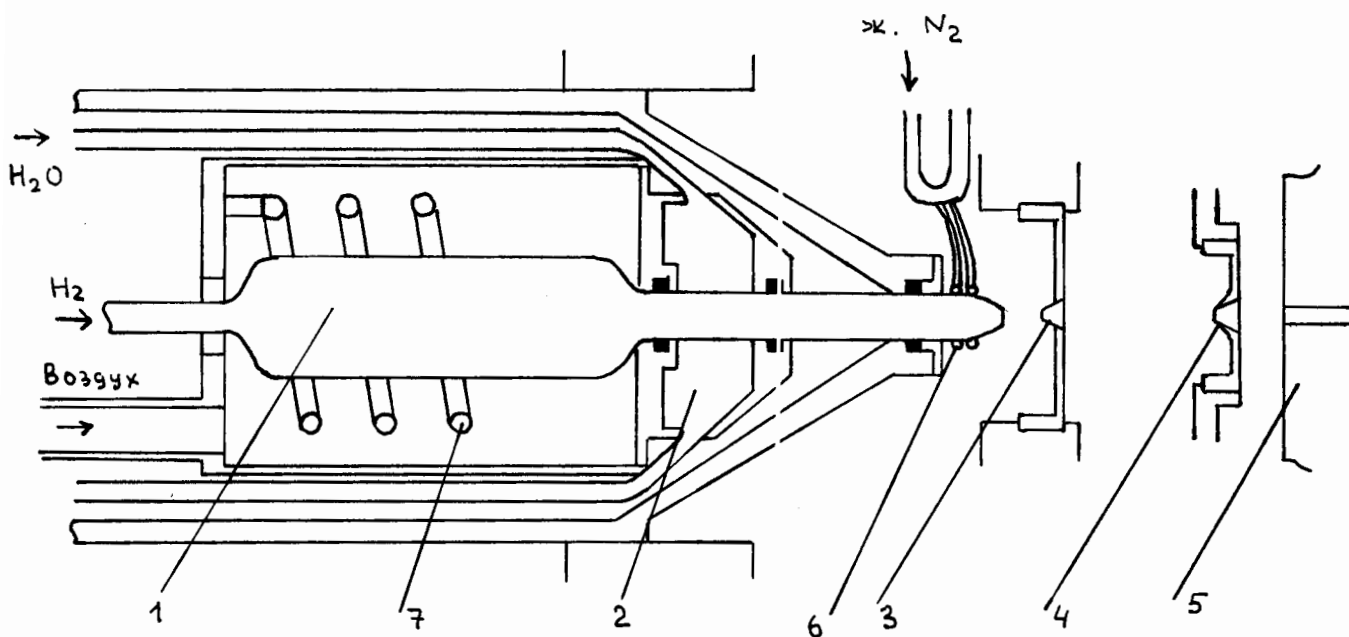


Рис. 4. Система формирования атмосферного пучка.

1 — разрядная колба, 2 — водяная ванна, 3 — скиммер, 4 — коллиматор, 5 — секступольный магнит, 6 — система охлаждения сопла жидким азотом, 7 — резонатор.

сепаратора располагалась коллимирующая диафрагма диаметром 3,5 мм. Расстояние между скиммером и коллиматором изменялось при перемещении по резьбе скиммера и коллиматора. Были испытаны также скиммеры диаметром 2 и 2,5 мм и коллиматоры диаметром 2,5 и 3 мм, но они оказались менее эффективными. Секступольный магнит располагался на минимально близком расстоянии к коллиматору (8±28) мм.

Разделительный магнит

Секступольный магнит длиной 544 мм имеет входную апертуру диаметром 5 мм, которая линейно увеличивается вдоль оси и на половине длины магнита достигает 10 мм, оставаясь далее постоянной. Полюса и ярмо магнита изготовлены из стали 3, а полюсные наконечники — из пермендюра. Они имеют трапециoidalное сечение с площадью основания 10,7 мм и высотой (15÷17,5) мм. После изготовления на шлифовальном станке наконечники были отожжены в соответствии с технологическими правилами. Полюсные наконечники крепились к полюсам винтами, проходящими в теле полюса и наконечника, с помощью технологического ложемент (для исключения поводки, образовавшейся при отжиге). Обмотка каждого полюса имеет 6 витков медной трубки ϕ 6x1 изолированной тефлоновой лентой. Пара катушек двух соседних полюсов выполнена из одного куска проволоки. Три секции соединены последовательно по току и параллельно по охлаждающей дистиллированной воде. Максимальное магнитное поле у полюсных наконечников, измеренное датчиком Холла ДХГ — 0,5 М, составляет примерно 7 кГс при токе возбуждения от мотора-генератора 200 А.

Монитор атомного пучка

Интенсивность поляризованного атомного пучка на выходе секступольного магнита определялась по приросту давления в стеклянной ловушке, охлаждаемой жидким азотом, которая соединена с компрессионной трубкой, захватывающей пучок, и ионизационным датчиком давления ПМИ-2. Компрессионная трубка имела диаметр 12,2 мм и длину 110 мм. Калибровочный коэффициент, устанавливающий связь между интенсивностью пучка атомов или молекул и приростом давления в ловушке, находился по формуле Кнудсена, в предположении, что атомы полностью рекомбинируют в ловушке. При отсчете давления по шкале

вакуумметра

$$C(H_I) = 2 \cdot 10^{21} \text{ атомов/с} \cdot \text{Тор}$$

$$C(H_2) = 10^{21} \text{ молекул/с} \cdot \text{Тор}$$

Ионизатор

Система ВЧ переходов осталась неизменной /5/ за исключением того, что расстояние между выходом секступоля и ионизатором (начало анода) было сокращено до 390 мм за счет конструктивных доработок. На рис. 5 представлена схема ионизатора.

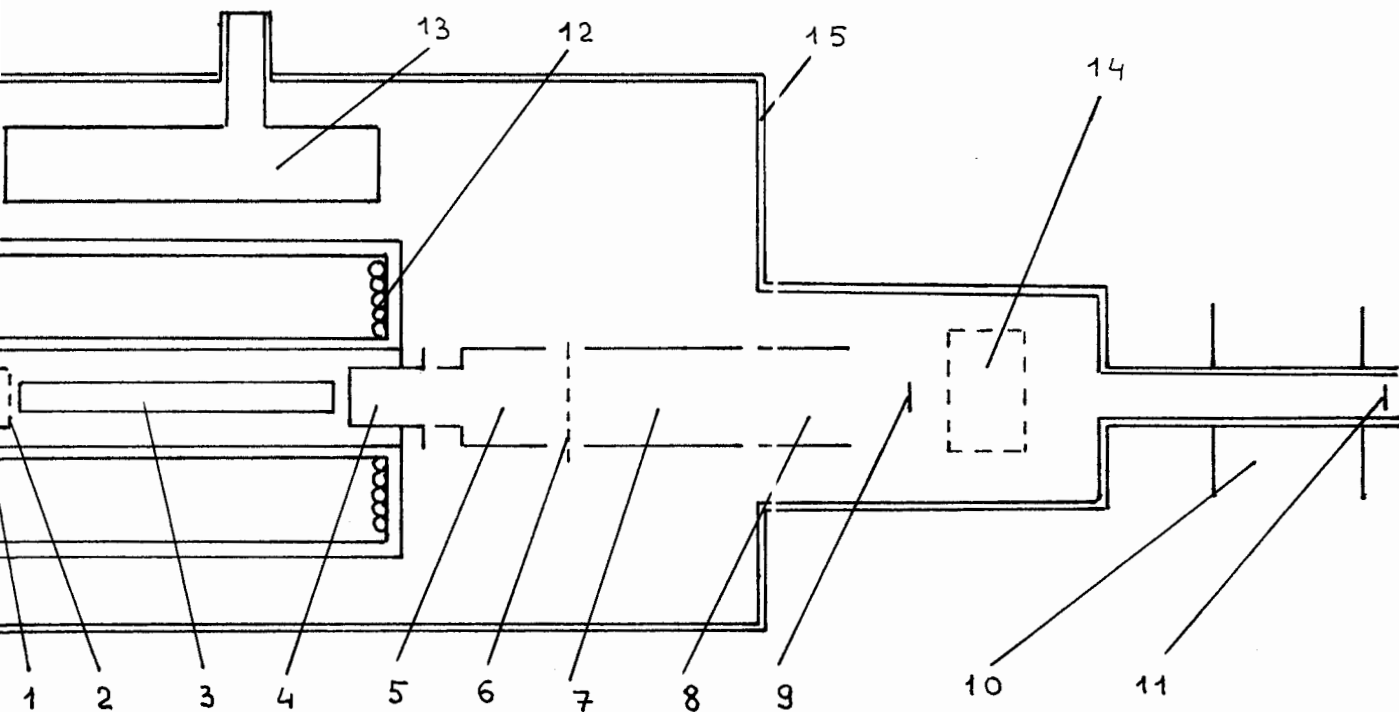


Рис. 5. Ионизатор. 1 - нить накала, 2 - сетка, 3 - анод,

4 - датчик тока, I0 - отклоняющий магнит, II - датчик тока, I2 - соленоид, I3 - азотная ловушка, I4 - магниторазрядный насос НМДО-025-I, I5 - вакуумный кожух.

Соленоид, создающий магнитное поле ионизатора, расположен в вакууме, катушка герметизирована. Распределение магнитного поля ионизатора приведено на рис. 6.

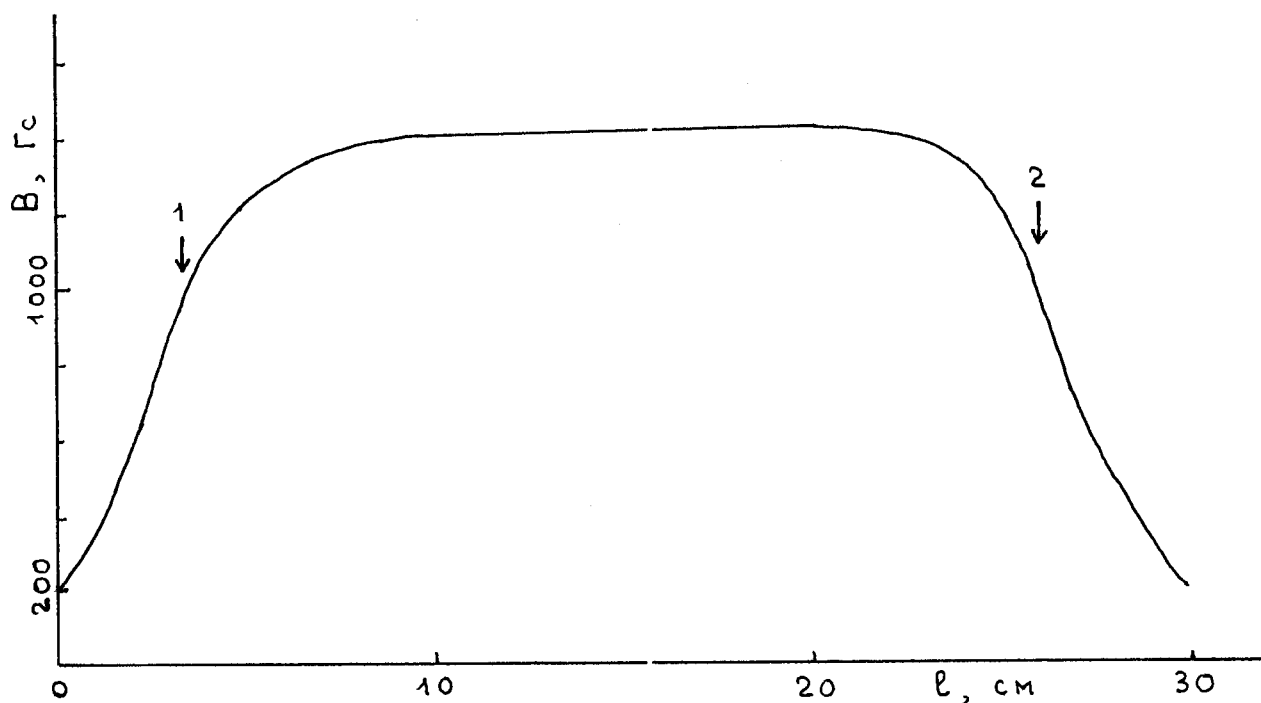


Рис. 6. Магнитное поле ионизатора при токе 200 А.

1 - положение нити накала, 2 - полжение вытягивающего электрода.

Общий принцип работы ионизатора, соответствует описанному в работе /6/. Новая конструкция более надежна в эксплуатации. Ионы,

выходящие из ионизатора, анализируются по массе отклоняющим магнитом.

Вакуумная система

С целью исключения попадания паров масла в разрядную колбу диссоциатор откачивается двухроторным механическим насосом ДВН-500. На рис. 7 приведена зависимость давления в камере сопла, пересчитанное на H_2 , в зависимости от расхода водорода.

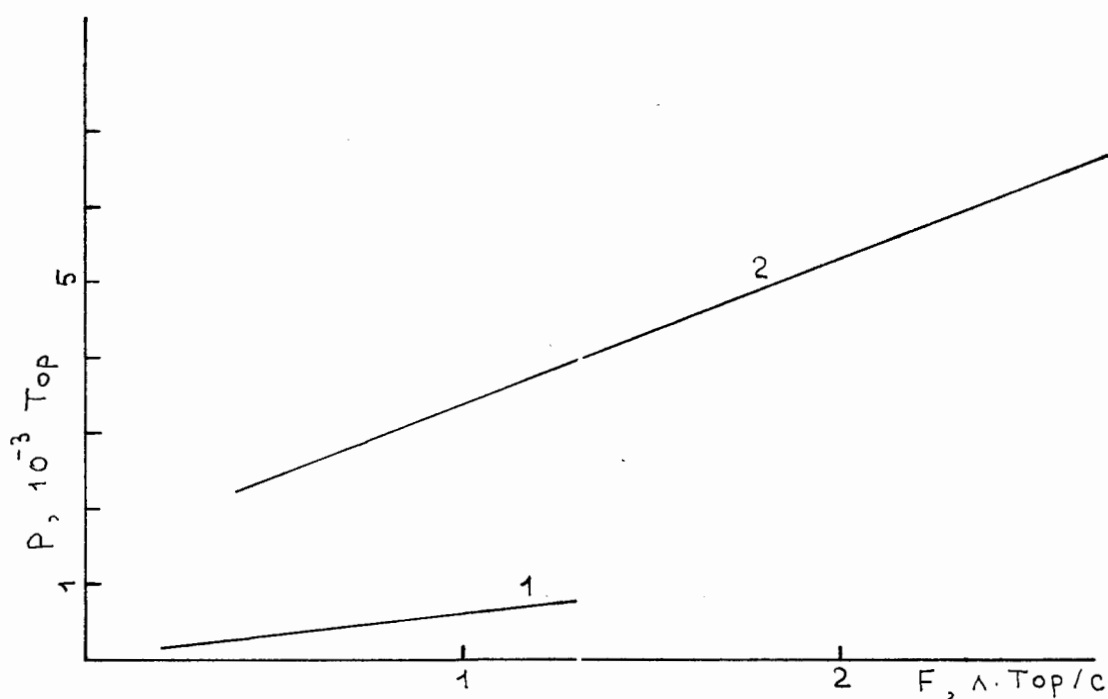


Рис. 7. Кривая 1 соответствует откачке насосом БН-1500, кривая 2 — ДВН-500; молекулярный водород.

Хотя давление увеличивается при откачке ДВН-500 примерно в 5 раз, это не влияет на интенсивность атомного пучка в рабочей области давлений, что согласуется с результатами работы ¹⁷⁾.

Область скиммер-коллиматор откачивалась паромасляным агрегатом ВА-5-4, и камера секступольного магнита — ВА-8-4. Ионизатор снабжен магниторазрядным насосом НМДО-025-1 со скоростью откачки по воздуху 250 л/с, предварительная откачка до 10^{-4} — 10^{-5} Тор осуществлялась насосом ВА-2-3.

В отсутствие подачи H_2 вакуум составлял: в области сопла - $2 \cdot 10^{-3}$ Тор, в области скиммера - $5 \cdot 10^{-6}$ Тор, в камере секступоля - $2 \cdot 10^{-6}$ Тор, в ионизаторе - $5 \cdot 10^{-7}$ Тор. При рабочем расходе ≈ 1 л·Тор/с, соответственно, $3,5 \cdot 10^{-3}$ Тор, $2 \cdot 10^{-5}$ Тор, $2,5 \cdot 10^{-6}$ Тор, $6 \cdot 10^{-7}$ Тор.

2. Результаты измерений

На ступени формирования атомного пучка была проведена большая серия экспериментов по изучению зависимости интенсивности молекулярного пучка от расстояния сопло-скиммер, скиммер-коллиматор, диаметров диафрагм и ряда других параметров.

На рис. 8 приведена зависимость интенсивности молекулярного пучка от расхода при двух различных расстояниях сопло-скиммер. Видно, что в области

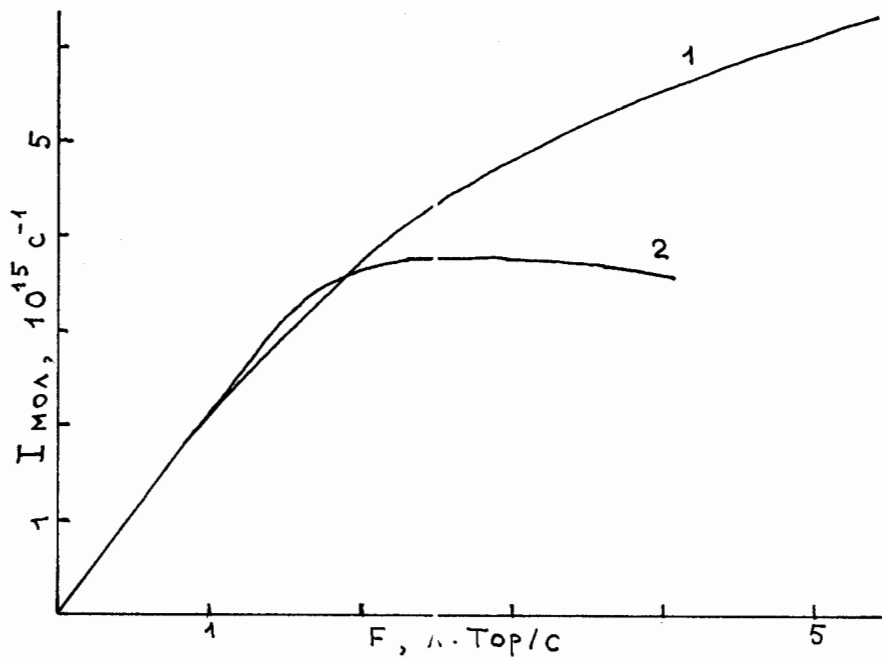


Рис. 8. Кривая 1 соответствует $l = 16$ мм, кривая 2 - $l = 12$ мм; диаметры сопла, скиммера и коллиматора равны 2,5; 3 и 3,5 мм; расстояние скиммер-коллиматор равняется 46 мм.

расходов H_2 , при которых происходит эффективная диссоциация ($\lesssim 1 \text{ л} \cdot \text{Тор}/\text{с}$) эффект насыщения еще не сказывается. На рис. 9 приводятся результаты измерений при перемещении сопла.

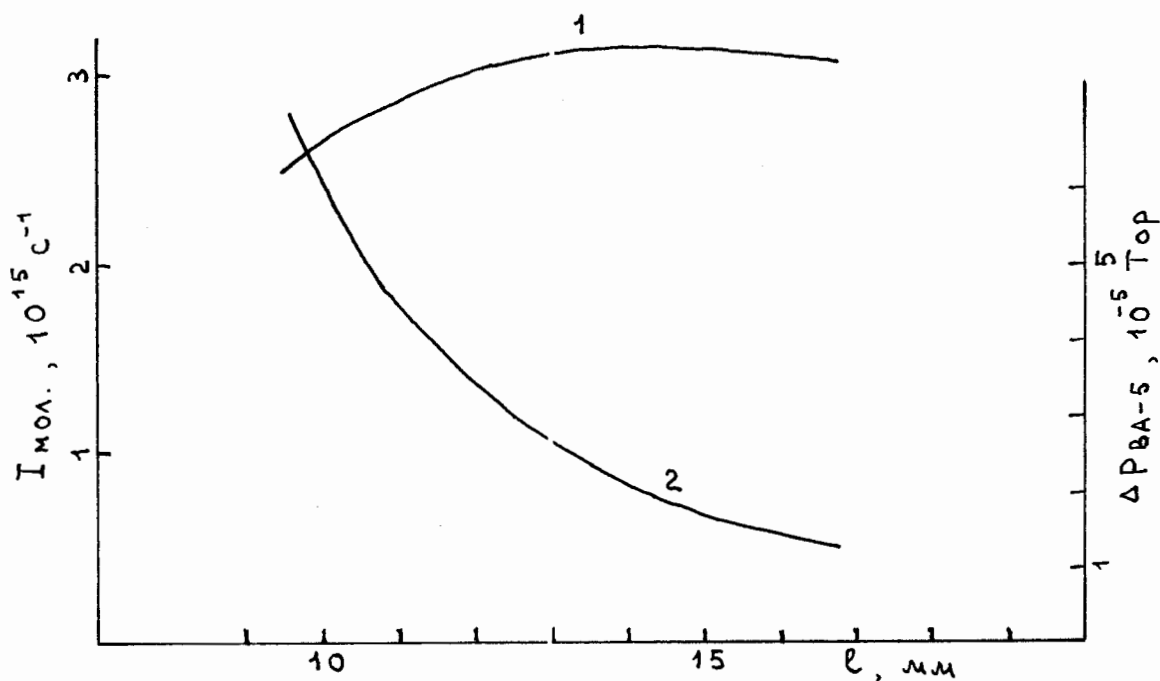


Рис. 9. 1 - интенсивность молекулярного пучка, 2 - прирост давления в камере скиммера; $F = 1,8 \text{ л} \cdot \text{Тор}/\text{с}$, остальное - как на рис. 8.

Как было указано выше, были испытаны три типа охлаждения разрядной трубки. Наиболее эффективным оказалось охлаждение утолщения воздухом и дальнейшего участка - водой. При этом типичный режим работы генератора: $U_a = 1,35 \text{ кВ}$, $I_a = 0,88 \text{ А}$, $U_3 = 600 \text{ В}$, $I_3 = 30 \text{ мА}$. Полное охлаждение разрядной трубки дистиллированной водой, так что ВЧ мощность проходила через воду требовало большой мощности, что приводило к перегреву кабеля и прекращению разряда. Типичный режим в этом случае: $U_a = 1,6 \text{ кВ}$, $I_a = 1,1 \text{ кВ}$.

Охлаждение участка разрядной трубки водой привело к понижению скорости атомов в пучке и увеличению интенсивности на выходе секступольного магнита от $2,6 \cdot 10^{16}$ до $3,2 \cdot 10^{16}$ атомов/с. Было проверено также охлаждение сопла жидким азотом, что для данной геометрии фор-

мирователя оказалось менее эффективным. Известно [7], что при охлаждении пучка необходимо изменять апертуру и положение секступольного магнита.

С помощью пластинки, покрытой MoO_3 была измерена форма пучка на выходе секступоля. Оказалось, что диаметр пучка не превышает 10 мм. Так как входной размер монитора атомного пучка равняется 12 мм, это значит что датчик полностью захватывает пучок.

На рис. 10 приведена зависимость интенсивности атомного пучка от тока возбуждения секступоля.

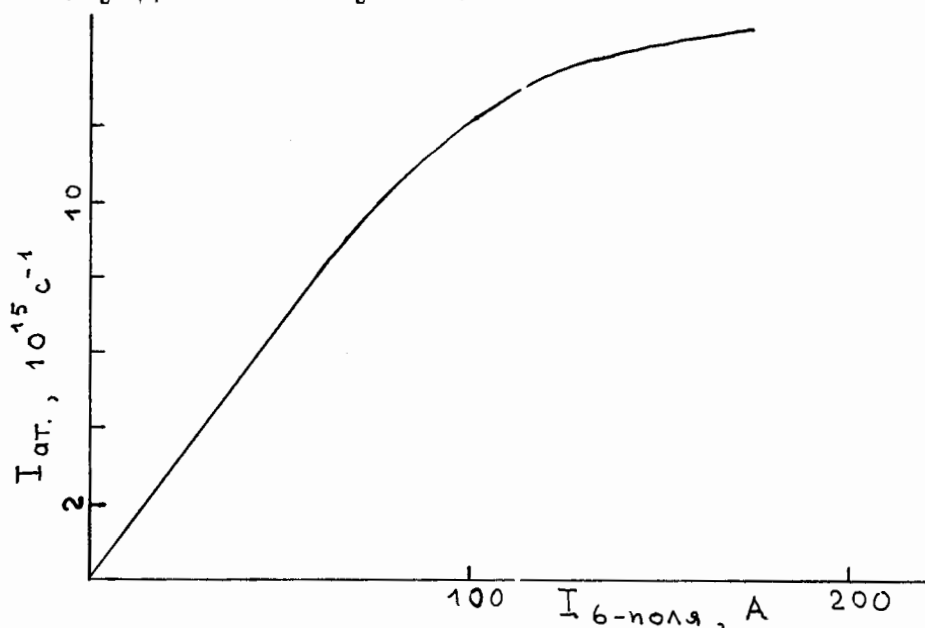


Рис. 10. Поток поляризованных атомов после секступоля.

В серии экспериментов был измерен эффект рассеяния молекулярного и атомного пучков на остаточном газе. Путем увеличения давления в отдельных отсеках была определена условная средняя длина свободного пробега. Оказалось, что для рассеяния на участке скиммер-коллиматор

$$\lambda \approx \frac{5 \cdot 10^{-3}}{P_{\text{H}_2}(\text{Тор})} \quad (\text{см}) \quad (1)$$

Как для атомов, так и для молекул H_2 . На длине секступоля

$$\lambda \approx \frac{10^{-3}}{P_{\text{H}_2}} \quad (2)$$

для молекул и

$$\lambda \approx \frac{2 \cdot 10^{-3}}{P_{H_2}} \quad (3)$$

для атомов с включенным секступолем. Здесь отчетливо проявляется эффект фокусировки атомов, рассеянных на малые углы. Разность в коэффициентах уравнений (1) и (2) обусловлена тем, что истинное давление на пути пучка выше, чем измерено манометром. Результаты этих измерений показывают, что потери пучка на рассеяние делятся примерно одинаково между камерой скиммера и камерой секступоля. Окончательная геометрия системы формирования была выбрана таким образом, чтобы при рабочем расходе газа потери на рассеяние были минимальными.

Наиболее оптимальным режимом является расход около 1 л·Тор/с, при котором степень диссоциации составляет 50–70%. При увеличении расхода цвет разряда бледнеет и интенсивность атомного пучка уменьшается. Поскольку для эффективности ионизации важна плотность атомов в пучке, ее можно увеличить охлаждением пучка до температуры ниже азотной. Поскольку расход не изменяется, степень диссоциации также не изменится. Однако, как упоминалось выше, охлаждение пучка необходимо требует изменения геометрии системы формирования и разделительного магнита.

Рабочие параметры ионизатора близки к достигнутым ранее /6/. Размер пучка в кроссовере составляет 13 см (определялось по нагару на медной пластинке). В оптимальных условиях работы источника атомов и форсированном режиме ионизатора ток поляризованных протонов достигает 15 мкА (магнитное поле ≈ 2 кГс, $U_a \approx 5$ кВ). Типичный режим ионизатора характеризуется параметрами: $U_a = 3$ кВ, $B = 1,5$ кГс, ток эмиссии 0,5 мА, ток анода 0,1 мА. Эффективность иони-

зации $(2\div 3) \cdot 10^{-3}$. При ухудшении вакуума до $(1\div 1,5) \cdot 10^{-6}$ эффективность ионизации падает из-за частичной нейтрализации пространственного заряда электронов. Расчеты показали, что значительная часть ионов в данной геометрии ионизатора теряется при вытягивании. Создание однородного поля в области вытягивания позволит существенно увеличить эффективность ионизации.

3. Заключение

Проведенные исследования на макете ИПП позволили добиться относительно высоких значений интенсивности атомного пучка $3,2 \cdot 10^{16}$ атомов/с и протонного тока (до 15 мкА). Это оказалось возможным благодаря тщательной доработки системы формирования атомного пучка, введения водяного и азотного охлаждения диссоциатора и формирователя. Ограниченные условия вакуумной откачки не позволяют достичь мирового уровня по интенсивности протонов, это требует увеличения примерно в 5 раз скорости откачки области скиммера и камеры разделительного магнита, что возможно осуществить использованием криогенной откачки со скоростью около 10^4 л/с.

Тим
Александр
Крозин
Сергей
Макс.

Литература

1. Плис Ю.А., Сороко Л.М. ОИЯИ, Р9-10312, Дубна, 1976.
2. Parker E.F. In: AIP Conference Proceedings No 35, N.Y., 1976, p. 382.
3. Clausnitzer G. et al. NIM, 1970, v. 80, p. 245.
4. Dierke R., Funkschau, 1961, v. 10, p. 261.
5. Плис Ю.А., Сороко Л.М. ОИЯИ, Р9-9945, Дубна, 1976.
6. Плис Ю.А., Сороко Л.М. ОИЯИ, Р9-10413, Дубна, 1977.
7. Haerberli W. In: Proc. Int. Symp. on High Energy Physics with Polarized Beams and Polarized Targets, Lausanne, 1980, p. 199.