

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



Б-438

3/21-7  
P13 - 9146

А.А.Белушкина, В.П.Вадеев, А.И.Валевич, Г.И.Гай,  
Е.Д.Донец, В.П.Ершов, Л.С.Котова, Ю.А.Плис,  
Ю.К.Пилипенко, В.В.Смелянский

4280/2-75

КРИОГЕННЫЙ ИСТОЧНИК  
ПОЛЯРИЗОВАННЫХ АТОМОВ ВОДОРОДА  
И ДЕЙТЕРИЯ

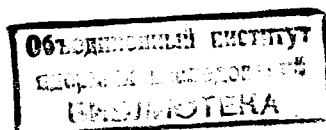
**1975**

P13 - 9146

А.А.Белушкина, В.П.Вадеев, А.И.Валевич, Г.И.Гай,  
Е.Д.Донец, В.П.Ершов, Л.С.Котова, Ю.А.Плис,  
Ю.К.Пилипенко, В.В.Смелянский

**КРИОГЕННЫЙ ИСТОЧНИК  
ПОЛЯРИЗОВАННЫХ АТОМОВ ВОДОРОДА  
И ДЕЙТЕРИЯ**

***Направлено в ПТЭ***



## 1. Введение

В последнее время исследователи проявляют все больший интерес к экспериментам с пучками поляризованных частиц, изучая зависимость от спина характеристик ядерного взаимодействия. Уже накоплен значительный опыт в создании методической базы таких экспериментов - в получении пучков быстрых поляризованных частиц как за счет ядерного рассеяния, так и путем ускорения ионов, предварительно поляризованных в источниках поляризованных ионов. Подробные сведения по этим вопросам содержатся, например, в материалах ряда международных конференций /1,2,3/ и обзорах /4,5/.

В 1974 году поляризованные протоны были ускорены на синхротроне Аргоннской национальной лаборатории, что позволило начать широкую программу экспериментов с поляризованными частицами высоких энергий. Однако получение пучков поляризованных частиц на синхротронах все еще остается сложной задачей. Не рассматривая детально все возникающие при этом трудности, укажем лишь на наиболее типичные проблемы в создании и эксплуатации источников поляризованных ионов для синхротронов.

Максимальной интенсивностью обладают в настоящее время источники, использующие метод атомного пучка. Для реализации этого метода необходимо наличие мультиполюсного магнита и мощной системы вакуумной откачки, обеспечивающей условия формирования атомного пучка. Поскольку на синхротроне источник должен находиться под потенциалом около 500 кВ и размещаться на специальной колонне, то имеются

жесткие ограничения на размеры источника и потребляемую мощность. Последнее обстоятельство существенно влияет главным образом на конструкцию источника поляризованных атомов и не позволяет удовлетворить всем технологическим требованиям. В этом случае кажется целесообразным для разработки такого источника использовать средства криогенной техники, а именно, сверхпроводящий мультиполюсный магнит и криогенные насосы. Источник такого типа компактен и требует небольшой мощности питания. Термостатирование крионасосов и сверхпроводящего магнита может осуществляться за счет периодически пополняемого запаса жидкого гелия. Продолжительность непрерывной работы источника поляризованных атомов зависит от скважности ускорителя. Для такого ускорителя, как, например, синхрофазотрон ОИЯИ, требуется импульсный источник, работающий с частотой 0,15 Гц и длительностью импульса 0,5 мс. В случае использования ионизатора-накопителя<sup>16/</sup> длительность импульса атомного пучка должна составлять 30–50 мс. Однако даже в этом случае время работы крионасосов от включения до регенерации может составлять несколько суток.

С целью изучения возможности реализации такого устройства в ЛВЭ ОИЯИ создан экспериментальный криогенный источник поляризованных атомов водорода и дейтерия "Криполь". Ниже описаны конструкция и первые результаты испытаний этого источника.

## 2. Конструкция и принцип работы источника "Криполь"

Источник "Криполь" предназначен для формирования атомного пучка водорода или дейтерия с атомами, поляризованными по спину электрона. При этом, как во всех аналогичных устройствах, осуществляются следующие основные процессы:

1. Диссоциация молекул водорода или дейтерия.
2. Формирование атомного пучка.
3. Разделение атомного пучка по электронному спину.

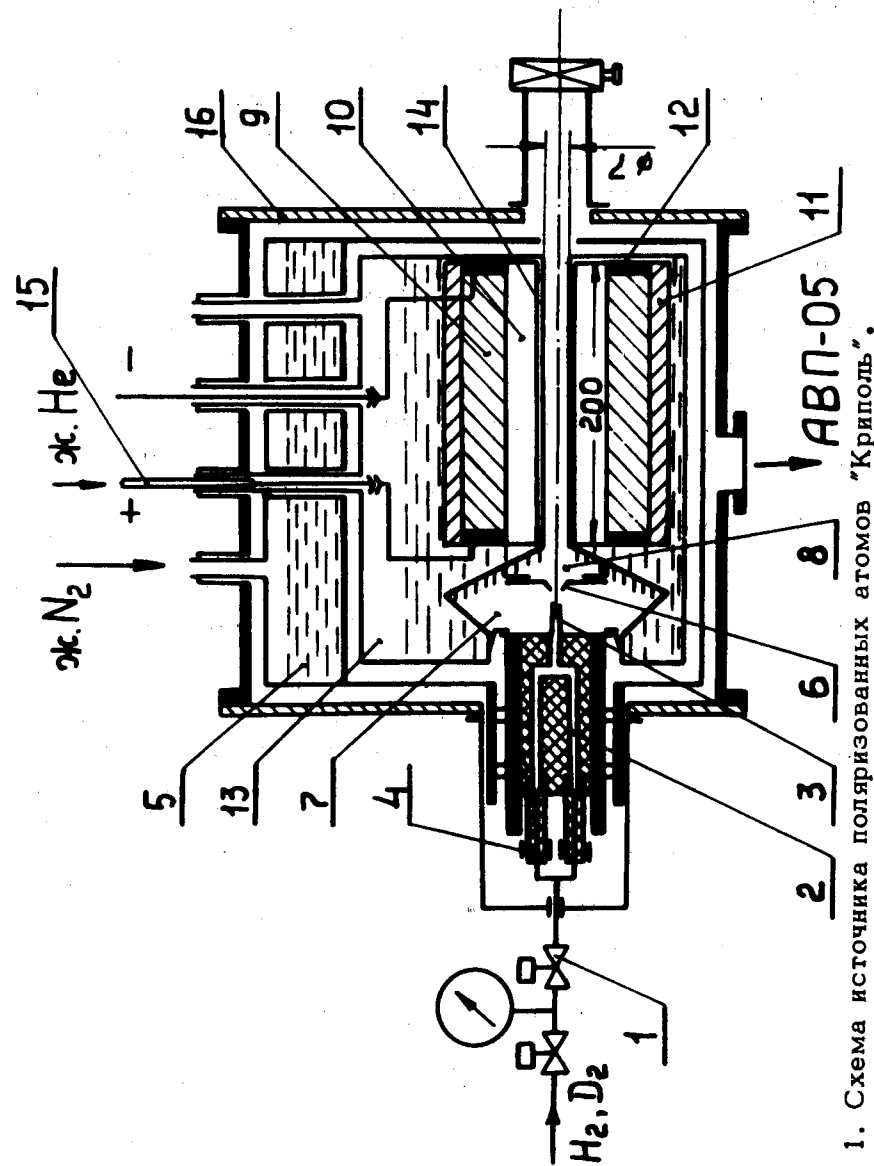


Рис. 1. Схема источника поляризованных атомов "Криполь".

На рис. 1 схематически изображен источник "Криполь", в котором последовательно реализуются перечисленные выше процессы. Газообразный водород (или дейтерий) импульсно поступает через клапан 1 в диссоциатор 2. За время, когда клапан открыт (7-10 мс), в диссоциатор подается различное количество газа в зависимости от давления перед клапаном. Обычно это давление равно 1,8 атм, что соответствует подаче в диссоциатор 200 тор.см<sup>3</sup> газа. Таким образом, давление в диссоциаторе регулируется изменением давления перед клапаном. Диссоциатор, имеющий U-образный канал диаметром 10 мм и длиной 2x100 мм, изготовлен из фторопласта, а сопло 3 - из стекла пирекс. Сопло выполнено в виде канала диаметром 1,35 мм. Для уменьшения рекомбинации атомов на стенках внутренние поверхности диссоциатора обрабатывались плавиковой кислотой и тщательно промывались дистиллированной водой.

Диссоциация молекул газа осуществлялась высокочастотным разрядом. Мощность подводилась к электродам диссоциатора 4 от генератора, работающего на частоте 230 МГц, и составляла 300 Вт в импульсе.

Корпус диссоциатора имеет тепловой контакт с экраном 5, имеющим температуру жидкого азота. Это позволяет отводить тепло, рассеиваемое в диссоциаторе, находящемся в вакууме, а также понизить температуру газа, вытекающего из сопла. Последнее обстоятельство, как известно<sup>/7/</sup>, улучшает условия получения и использования поляризованного атомного пучка. В рабочем режиме температура корпуса диссоциатора и сопла не превышала 150°K.

Газ в атомарном состоянии вытекает из сопла диссоциатора, образуя свободно расширяющуюся струю. Периферические слои струи срезаются коническим сепаратором 6 с диаметром 1,3 мм, находящимся на расстоянии 4-5 мм от сопла. С целью меньшего возмущения потока внешний и внутренний углы сепаратора выбраны равными 50° и 40° соответственно<sup>/8/</sup>.

Известно, что важнейшими условиями формирования атомного пучка являются давление не выше  $\sim 10^{-3}$  тор в пространстве от сопла до сепаратора (сопловая камера) и не выше  $\sim 10^{-4}$  тор - после сепаратора. Обычно такие условия осуществить нелегко, так как требуются насосы большой производительности и, кроме того, конструктивно трудно обеспечить необходимую проводимость каналов откачки газа. В случае источника "Криполь" стенки сопловой камеры 7 и камеры сепаратора 8 охлаждаются жидким гелием и работают как криопанель насоса. Из работы<sup>/9/</sup> следует, что коэффициент "прилипания" атомов водорода имеет резкий минимум при температуре около 4,2°K. Это значит, что для эффективной криосорбции требуется либо предварительная рекомбинация атомов водорода, например, на поверхности, имеющей температуру жидкого азота, либо уменьшение температуры криопанелей путем снижения давления над поверхностью жидкого гелия.

Атомный пучок, сформированный соплом и сепаратором, попадает в неоднородное поле шестиполюсного магнита с апертурой 10 мм и длиной 200 мм, где происходит пространственное разделение атомов по электронному спину. Атомы с проекцией электронного спина, равной +1/2, фокусируются на ось и образуют пучок поляризованных атомов, а атомы с проекцией, равной - 1/2, дефокусируются и должны быть откачаны. Полюса 9 и полюсные наконечники 10 магнита изготовлены из стали армко, а ярмо 11 - из малоуглеродистой стали. Обмотки 12 полюсов магнита выполнены из сверхпроводящего кабеля (NbTi) диаметром 0,5 мм. Каждая из обмоток содержит 75 витков. По кабелю обмотки возможно пропускание тока до 150 А. Шестиполюсный магнит работает в короткозамкнутом режиме, для чего имеется сверхпроводящий ключ с тепловым управлением.

Шестиполюсный магнит помещен в криостат 13 для жидкого гелия, так что одной из стенок криостата служит трубка 14 с внутренним диаметром 7 мм, введенная в межполюсное пространство. Таким образом, дефоку-

сированная компонента атомного пучка может быть сорбирована на внутренней поверхности трубки. Заливка криостата жидким гелием производится с помощью переливного сифона 15, который одновременно служит одним из тоководов при запитке магнита. Для уменьшения испаряемости жидкого гелия криостат 13 окружен экраном 5, имеющим запас жидкого азота. Все устройство размещено в вакуумном кожухе 16, связанном с системой предварительной откачки.

### 3. Эксперименты на стенде по формированию атомного пучка

При импульсной работе диссоциатора скорость истечения газа из сопла изменяется во времени и зависит от многих факторов. Очевидно, что диссоциацию газа необходимо производить в то время, когда интенсивность потока близка к максимальной. Для исследования временных и оценки количественных характеристик атомного пучка был создан специальный криогенный стенд, основные элементы которого изображены на рис. 2а. Диссоциатор 1 с соплом диаметром 1,15 мм, сепаратор 2 диаметром 1,05 мм и охлаждаемые жидким гелием стенки камер сопла 3 и сепаратора повторяют конструкцию аналогичных устройств источника "Криполь". Интенсивность атомного пучка измерялась компрессионной ячейкой 4 с ионизационным манометром ЛМ-3-2. Для измерения временных характеристик потока перед входным отверстием ячейки был установлен вращающийся диск 5, имеющий щель с угловой протяженностью 120°. Время экспонирования пучка определялось скоростью вращения диска. Схема синхронизации позволяла совмещать щель с отверстием ячейки в различные моменты времени по отношению к моменту срабатывания впускного клапана.

На рис. 2б показана зависимость давления в ячейке от времени в течение одного импульса. Скорость вытекания газа из ячейки характеризуется участками кривой давления в периоды, когда пучок перекрыт для

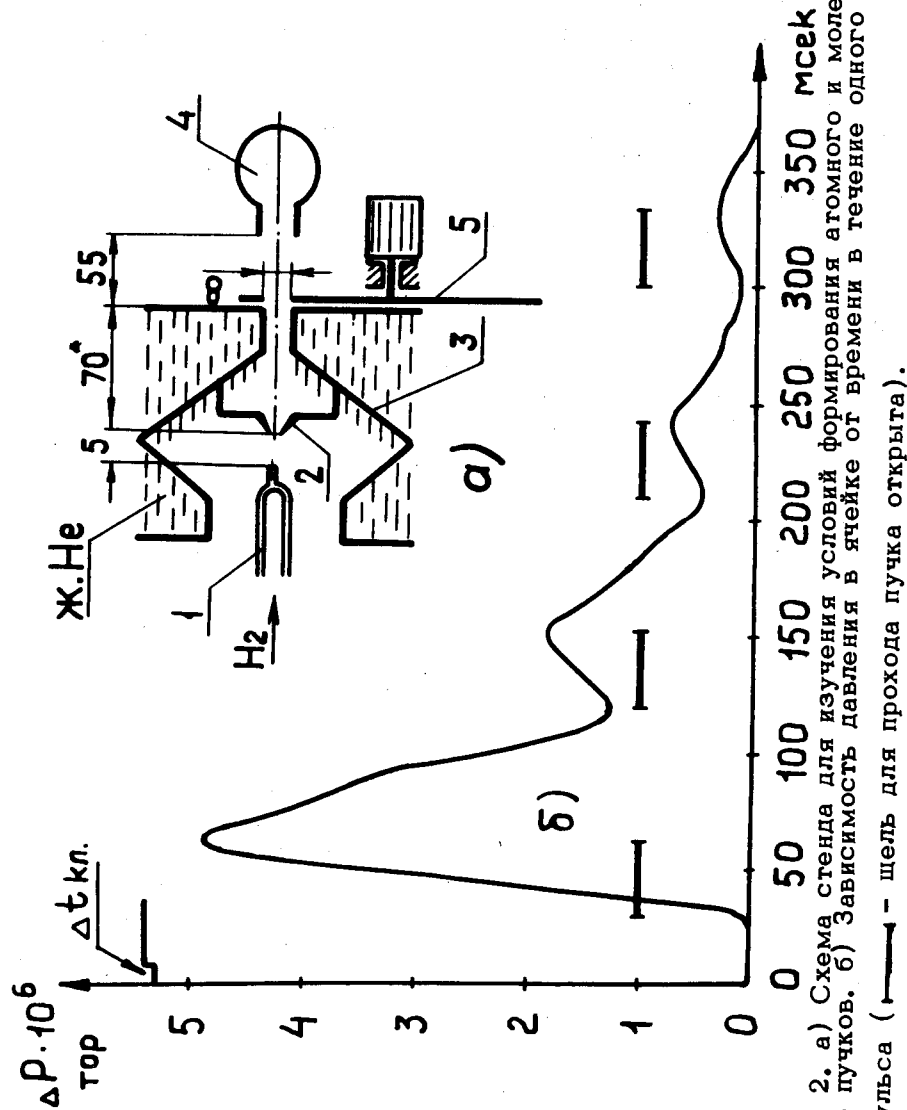


Рис. 2. а) Схема стенда для изучения условий формирования атомного и молекулярного пучков. б) Зависимость давления в ячейке от времени в течение одного импульса ( — щель для прохода пучка открыта).

попадания в ячейку. Видно, что максимум истечения газа из диссоциатора приходится на участок времени между  $\approx 30$  и  $100$  мс от момента срабатывания впускного клапана. Оценки показывают, что в рабочих условиях интенсивность пучка равна  $\approx 10^{15}$  молекул/с.

На рис. 3 показаны зависимости интенсивности пучка от времени для различных задержек момента открытия щели по отношению к моменту включения клапана. Максимальный сигнал наблюдался, когда время задержки составляло  $12$  мс, и снижался до  $65\%$  максимальной величины, когда это время составляло  $60$  мс.

Таким образом, показано, что процесс истечения газа из диссоциатора относительно длинный, и найден оптимальный момент включения высокочастотного разряда. Показано также, что интенсивность пучка зависит от расстояния между соплом и сепаратором. Максимум интенсивности наблюдался при расстоянии  $4,5$  мм, или  $3,5 \pm 4,3$  в единицах диаметра сопла, что хорошо согласуется с данными других авторов<sup>/7/</sup>. При одинаковых условиях подачи газа в диссоциатор понижение температуры диссоциатора от комнатной до  $70-80^\circ\text{K}$  уменьшало примерно в  $3$  раза регистрируемый сигнал давления в ячейке и увеличивало длительность истечения. Одновременно уменьшалось влияние расстояния между соплом и сепаратором на интенсивность пучка.

Для контроля работы диссоциатора, определения размеров сечения и интенсивности атомного пучка вместо компрессионной ячейки устанавливалась стеклянная пластинка с покрытием из  $\text{MoO}_3$ . Импульс высокой частотной мощности совпадал с промежутком времени, когда пластинка была открыта:  $16-49$  мс от момента срабатывания клапана.

Через  $100$  циклов работы (суммарное время экспонирования  $\approx 3$  с) на пластинке начинало появляться пятно диаметром  $\approx 12$  мм. Т.к. пороговая чувствительность детектора составляла  $6 \cdot 10^{15}$  атомов/см<sup>2/1</sup>, интенсивность атомного пучка в нашем случае была равна  $\approx 2 \cdot 10^{15}$  атомов/с, что согласуется с результатами

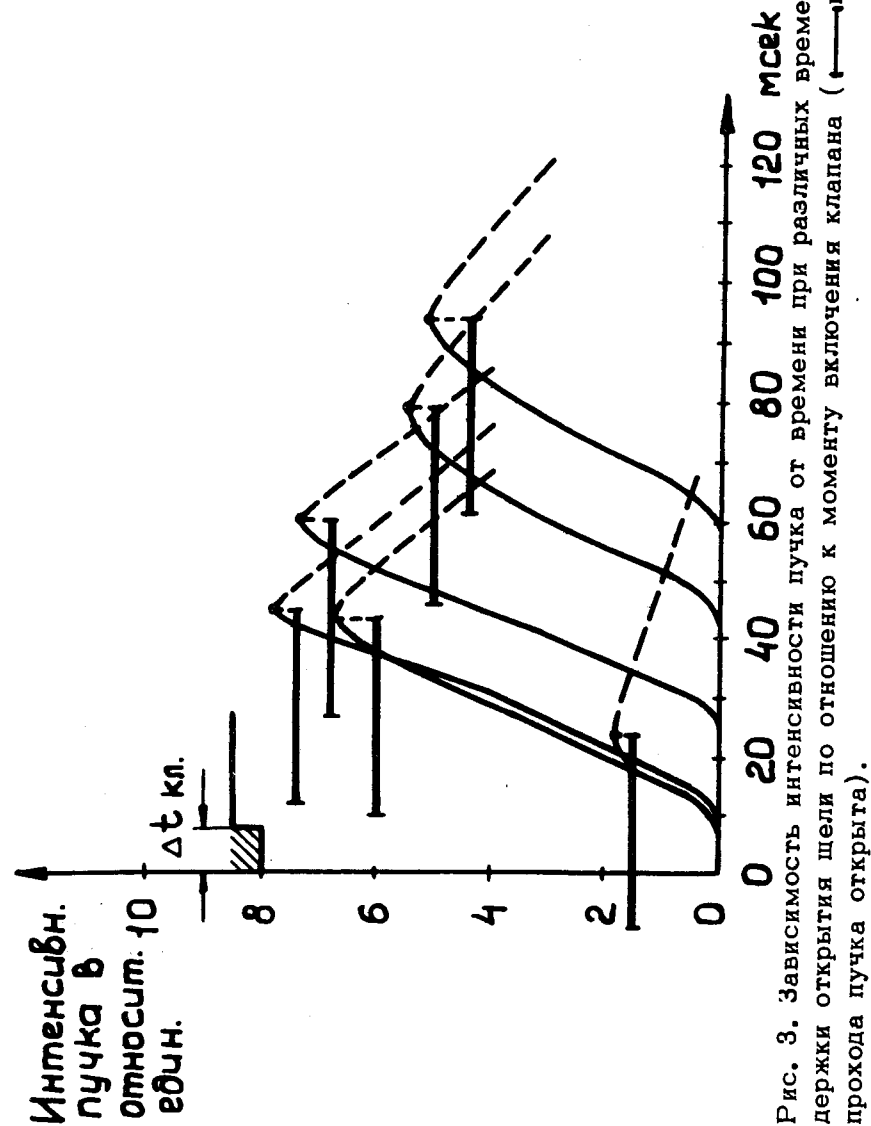


Рис. 3. Зависимость интенсивности пучка от времени при различных временах задержки открытия щели по отношению к моменту включения клапана (←—щель для прохода пучка открыта).

измерений компрессионной ячейкой и свидетельствует о возможности формирования атомного пучка с хорошей степенью диссоциации.

#### 4. Эксперименты с источником "Криполь"

В период подготовки к работе и охлаждения необходимое разрежение в объеме источника создавалось вакуумным паромасляным агрегатом с производительностью 200 л/с. После заливки жидкого гелия в криостат откачка вакуумным агрегатом прекращалась и поддержание вакуума  $(1-2) \cdot 10^{-6}$  тор в источнике происходило за счет криосорбции. В момент импульса давление в районе датчика, установленного на вакуумном кожухе, практически не изменялось. Давление в сопловой камере, камере сепаратора и апертуре магнита не измерялось. По-видимому, между импульсами давление в этих камерах  $\sim 10^{-7}$  тор. Сублимация твердого газа происходила лишь при полном испарении жидкого гелия из криостата, в то время как некоторое ухудшение вакуума в момент импульса начинает происходить несколько ранее. Испаряемость жидкого гелия из криостата составляла  $\approx 1$  л/час и, по-видимому, может быть уменьшена в дальнейшем.

Основное требование, предъявляемое к источнику поляризованных атомов, состоит в том, чтобы получить атомный пучок максимальной интенсивности и минимальной расходимости. Это связано с тем, что ионизаторы имеют невысокий коэффициент ионизации ( $\sim 10^{-3}$ ), а область ионизации имеет поперечный размер  $\approx 10$  мм, находясь от выходного конца мультиполюсного магнита на расстоянии  $\approx 500$  мм.

Определение расходимости атомного пучка, полученного из источника "Криполь", а также оценка его интенсивности производились с помощью пластинок, покрытых слоем  $\text{MoO}_3$ . Для этого пластинки устанавливались по пути пучка на разных расстояниях от выходного конца шестиполюсного магнита. Было выполнено несколько серий измерений с водородом и дейтерием

при следующих условиях: давление газа перед клапаном 2 атм; длительность импульса открытия клапана 4,8 мс; высокочастотная мощность, вводимая непосредственно в разряд,  $\approx 300$  Вт; длительность импульса в.ч. генератора 75 мс; время задержки импульса относительно момента включения клапана 12 мс. Результаты измерений представлены в таблице.

Таблица

Рабочий газ	Дейтерий		Водород				
Ток шестиполюсного магнита (А)	0	140	90 140	0 45	140	140	145 90 140
Количество циклов	350	350	650	800 650	1200	50	650
Расстояние до пластинки (мм)	73	73	255	255	442	73	255
Диаметр пятна на пластинке (мм)	7,5	1,5+2	3 3	отсут. отсут.	4	1,5+2	3 3 3

На основе полученных результатов можно сделать следующие основные выводы.

1. Существует возможность создания криогенного варианта источника поляризованных атомов водорода и дейтерия.
2. Система формирования атомного пучка и шестиполюсный магнит позволяют транспортировать атомный пучок на расстояние  $\approx 500$  мм.
3. Интенсивность пучка атомов, поляризованных по спину электрона, согласно оценке по пороговой чувствительности пластинок, на расстоянии 442 мм от выходного конца магнита равна  $10^{13} + 10^{14}$  атомов/с при плотности потока  $\sim 10^{15}$  атомов/см<sup>2</sup>·с.
4. Расходимость атомного пучка составляет величину  $\sim 10^{-2}$  рад.



## Литература

1. Поляризация нуклонов (Труды Международной конференции по поляризационным явлениям в ядрах, Базель, 1960), М., Госатомиздат, 1962.
2. Polarization Phenomena in Nuclear Reactions (Proc. of the 3d Int. Symp., Madison 1970), ed. by H. H. Barschall and W. Haeberli Madison, Univ. Wisconsin Press, 1971.
3. Proc. of the Symp. on Ion Sources and Formation of Ion Beams (Upton, BNL, 1971), Brookhaven National Laboratory, Preprint BNL-50310, Upton, 1971.
4. W. Haeberli. Ann. Rev. Nucl. Sci., 17, 373 (1967).
5. Ю.А.Плис, Л.М.Сороко. УФН, 107, 281 (1972).
6. Е.Д.Донец, Ю.А.Плис. Сообщение ОИЯИ, P9-5446, Дубна, 1970.
7. R. Risler et al. Nucl. Instr. Meth., 121, 425 (1974).
8. U. Bossel et al. Rarefied Gas Dynamics, ed. by L. Trilling and H. Y. Wachman, Acad. Press, New-York, v.2, pp.945-951, 1969.
9. R. T. Brackmann, W. L. Fite. J. Chem. Phys., 34, 1572 (1961).

Рукопись поступила в издательский отдел  
8 сентября 1975 года.