

П-389

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9 - 11459

ПЛИС  
Юрий Андреевич

ИСТОЧНИК ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ИОНОВ  
ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 1978

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук Л.М.СОРОКО

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Р.П.СЛАБОСПИЦКИЙ

доктор физико-математических наук П.Р.ЗЕНКЕВИЧ

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова, Москва.

Защита диссертации состоится " " \_\_\_\_\_ 1978 года  
в \_\_\_\_\_ часов на заседании Специализированного совета Д-56/3  
при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института  
ядерных исследований, г.Дубна, Моск.обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " " \_\_\_\_\_ 1978 года

Ученый секретарь Специализированного совета  
кандидат физико-математических наук

Ю.А.БАТУСОВ

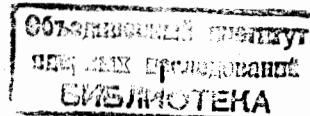
## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Эксперименты с поляризованными частицами, занимающие особое место в ядерной физике и физике элементарных частиц, позволяют наиболее прямым способом изучать спиновую зависимость взаимодействий. Пучки поляризованных частиц можно получать на ускорителях Ван-де-Граафа, тандемах, линейных ускорителях, циклотронах, малых фазотронах, синхрофазотроне Аргоннской национальной лаборатории и на "мезонных фабриках". Однако до настоящего времени не удалось получить первично-поляризованных частиц на больших фазотронах.

Цель работы. Диссертация посвящена проблеме создания источника поляризованных ионов для ускорителей промежуточных энергий, в частности, для фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля, разрабатываемого в ЛЯП ОИЯИ (установка "Ф"). Для разрешения этой проблемы создана установка, состоящая из источника поляризованных протонов и поляриметра медленных протонов. Исследования, проведенные на этой установке, позволили найти принципиальную схему источника поляризованных протонов для установки "Ф", его конструкцию и оптимальные режимы работы отдельных узлов.

Научная новизна. Впервые получены следующие результаты:

- 1) создан диссоциатор водорода, имеющий автоматическое согласование внутреннего сопротивления высокочастотного автогенератора с импедансом разряда;
- 2) разработан метод накопления поляризованных ионов в магнито-сфокусированном электронном пучке;
- 3) создан поляриметр медленных протонов, исследованы его характеристики, найдена оптимальная конструкция радиочастотного поляризатора, а также получена поляризация протонов в атомном пучке, близкая к I;
- 4) предложен метод накопления поляризованных ионов в электронном кольце коллективного ускорителя и определены условия сохранения поляризации;
- 5) проанализированы экспериментальные данные и обнаружено хорошее согласие между теорией и экспериментом;
- 6) проведены численные расчеты деполаризации протонов при ускорении и установлены допустимые отклонения параметров магнитного поля установки "Ф" от проектных.



### Практическая значимость

1) Разработанный метод измерения поляризации протонов малых энергий позволяет контролировать поляризацию до инжекции ионов в ускоритель и тем самым оптимизировать работу различных устройств, предназначенных для сокращения деполяризации при ускорении. Кроме того, он может быть использован и в других исследованиях по атомной физике.

2) Предложенный метод накопления поляризованных ионов дает высокую импульсную интенсивность в течение времени захвата ускорителя, особенно существенную для синхрофазотронов.

3) Созданная экспериментальная установка может быть использована на установке "Ф" для исследования широкого круга реакций с поляризованными протонами.

4) Результаты экспериментальных и теоретических исследований указывают пути увеличения интенсивности пучка поляризованных ионов.

5) Обоснованы значения допусков на точность шиммирования магнитного поля установки "Ф", при которой деполяризация не превысит заданной величины.

Объем работы. Диссертация изложена на 102 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 35 рисунков, 4 таблицы и 76 ссылок на литературу.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе, носящей обзорный характер, кратко описаны известные методы получения поляризованных ионов. Определены общие понятия, относящиеся к поляризации протонов и дейтронов и поведению атомов в магнитном и электрическом полях. Для разработки источника поляризованных протонов (ИПП) выбран метод атомного пучка ("классический"), дающий максимальную интенсивность положительных ионов с возможностью её увеличения в импульсном режиме.

Во второй главе обобщены результаты теоретического анализа процессов в ИПП, функционирующем по методу атомного пучка.

На основе гидродинамических соотношений подробно рассмотрена задача истечения молекулярного и атомарного водорода из диссоциатора  $1/2$ . Предельное число Маха  $M^m$ , до которого ускоряется поток, определяется из условия, что при достаточно больших расстояниях от сопла гидродинамическое течение переходит в сво-

бодный поток. Значение  $M^m$  тем больше, чем меньше число Кнудсена  $Kn_0 = \lambda_0/d_0$ , определяемое отношением средней длины свободного пробега частиц в диссоциаторе к диаметру сопла. При заданном расходе газа  $Kn_0$  уменьшается с диаметром сопла и температурой газа.

На некотором расстоянии от сопла обычно устанавливается сепаратор - конусообразная диафрагма. Имеется сильное ограничение на максимальное значение полного угла внешнего конуса  $\alpha_{\text{макс}}$ , которое определяется процессом отражения присоединенной ударной волны (Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред, М., ГИИЛ, 1954, с.511). Для одноатомного газа при  $M_1 < 2$  получено соотношение

$$\alpha_{\text{макс}} \approx 40^\circ (M_1 - 1)^{1/2}, \quad (I)$$

где  $M_1$  - число Маха в потоке непосредственно у сепаратора.

Для пространственного разделения атомов водорода по состояниям сверхтонкой структуры чаще всего используют секступольный магнит. В диссертации рассмотрены его фокусирующие свойства и получены выражения для матрицы передачи; необходимые для совмещения пучка поляризованных атомов с электронным пучком ионизатора. На основе лагранжева формализма развит метод точного расчета аксептанса разделительного магнита  $1/2$ . С помощью ЭВМ для типичных случаев вычислен аксептанс секступольного магнита  $\bar{\Omega}$  с линейно увеличивающейся вдоль оси апертурой (рис.1). Здесь  $l_1$  - расстояние от источника атомов до входа в магнит,  $2\tau_{m_1}$  - начальная апертура магнита, апертура увеличивается вдоль оси по закону  $\tau_m = \alpha z$ ,  $S = (\alpha_0/\alpha)^2$  и  $\alpha_0^2 = 2\mu_B V_m / m v^2$ , где  $\mu_B$  - магнетон Бора,  $V_m$  - магнитное поле у полюсных наконечников,  $m$  и  $v$  - масса и скорость атомов. Нижняя кривая дает зависимость  $\bar{\Omega} (l_1 / \tau_m)$  для секступоля с постоянной апертурой.

В разработанном ИПП для передачи поляризации от электронов к протонам применяется система радиочастотных переходов в слабом магнитном поле (около 10 Гс). В этом случае  $m_F$  - хорошее квантовое число и уровни энергии 1, 2 и 3 (рис.2) приближенно эквидистантны. Поэтому РЧ- поле вызывает переходы между несколькими уровнями с одним и тем же  $F$ , но с разными  $m_F$ . Поскольку в атомном пучке на выходе разделительного магнита заселены только состояния 1 и 2, после адиабатического перехода равнозаселенными становятся состояния 2 и 3. При ионизации тако-

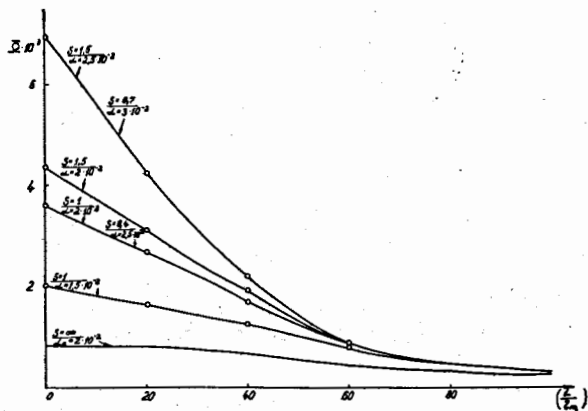


Рис. 1. Зависимость аксептанта секступольного магнита от расстояния между источником и магнитом.

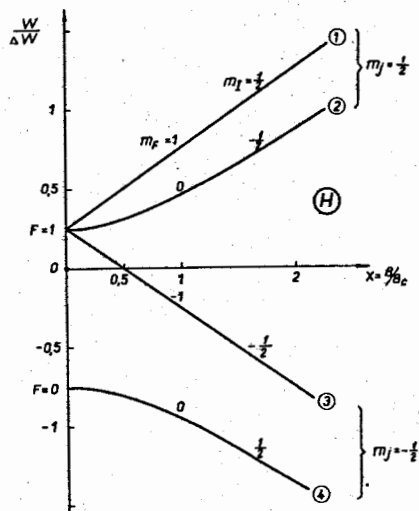


Рис. 2. Диаграмма уровней энергии атома водорода в магнитном поле.

го пучка в сильном магнитном поле степень поляризации протонов равна  $P = -I$ . Поляризация  $P = +I$  получается при изменении направления магнитного поля ионизатора.

Ионизацию атомов производят электронным ударом в сильном магнитном поле ( $B > 1$  кГс). Пучок электронов обычно инжектируют внутрь цилиндрического анода, находящегося под потенциалом

$U_a \approx 500$  В. Если потенциал анодного электрода превышает  $I+2$  кВ, то при достаточно большой величине магнитного поля возникает высоковакуумный разряд Пеннинга, основной характеристикой которого является то, что число осцилляций, совершаемых каждым электроном, весьма велико, и для поддержания разряда требуется небольшой ток эмиссии.

Если ускоритель работает в импульсном режиме, то поляризованные ионы можно питаться накапливать в течение времени между импульсами и вытягивать за время захвата ионов в процесс ускорения. Принцип одного из ионизаторов с накоплением ионов описан в работе (Coiffet P. C. R. Ac. Sci 1970, B270, p.343).

С участием автора был разработан новый способ накопления поляризованных ионов [3] при помощи электронного пучка, сформированного в сильном продольном магнитном поле внутри секционированной дрейфовой трубки. Принципиальная схема ионизатора с накоплением ионов дана на рис. 3. Пучок электронов, вытягиваемых электрическим полем из кольцевого катода 1, сжимается под действием нарастающего вдоль оси магнитного поля в сплошной пучок. Атомы, движущиеся соосно с электронами, ионизируются внутри дрейфовой трубки. Электроны попадают на коллектор 4, а ионы накапливаются внутри дрейфовой трубки 3, оконечные электроды которой находятся под потенциалом более высоким, чем у остальных электродов. В радиальном направлении ионы удерживаются электрическим полем, создаваемым объемным зарядом пучка электронов. На рис. 3а показано распределение потенциала на электродах в процессе накопления ионов. Быстрое вытягивание ионов производят при помощи кратковременно действующего градиента потенциала вдоль дрейфовой трубки (рис. 3б).

Расчеты показывают, что время накопления для  $U_a = 3$  кВ и плотности атомов  $10^{11}$  ат/см<sup>3</sup> составляет около 1 мс. При величине электронного тока около 2 А (Овсянников В.П. ОИЯИ, I3-9584, Дубна, 1976) и длине ионизатора 1 м число накопленных протонов достигает значения  $2,5 \cdot 10^{11}$ . Возможность экстракции ионов за вре-

мя несколько десятков мкс доказана экспериментально (Вадеев В.П. и др. ОИЯИ, Р7-10823, Дубна, 1976).

В процессе накопления поляризованные ионы испытывают большое число столкновений с электронами, однако потери поляризации не ожидается, так как для нерелятивистских электронов кулоновские столкновения на нее не влияют.

У фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля частота циклов ускорения составит 600 Гц, а время захвата - 20 мкс. Если в течение этого времени вытянуть из ионизатора все накопленные ионы ( $1,5 \cdot 10^{11}$  при длине ионизатора 60 см), то импульсный ток инжекции составит 1,2 мА. При коэффициенте фазового захвата, равном 1/3, и эффективности транспортировки от ионизатора до центра ускорителя, равной 0,1, интенсивность выведенного поляризованного пучка составит 0,3 мкА. Это в 250 раз выше проектного значения потока поляризованных протонов, если получать их рассеянием на мишени.

Аналогичным образом идет процесс накопления ионов в электронном кольце коллективного ускорителя. Электронное кольцо имеет сильное собственное магнитное поле, и при движении протонов внутри потенциальной ямы электронного кольца на спин протона действует переменное во времени магнитное поле, способное деполаризовать ионы. Анализ показывает<sup>4/</sup>, что условие малой деполаризации ионов устанавливает предел на полное число электронов в кольце. Для кольцетрона ОИЯИ условие сохранения поляризации  $P \geq 0,9$  приводит к ограничению  $N_e \leq 3 \cdot 10^{13}$ . Ожидаемая интенсивность пучка ускоренных поляризованных ионов равна  $3 \cdot 10^{11}$  протонов/имп.

При инжекции поляризованных протонов в сильноточный фазотрон энергия протонов составляет 10 кэВ. Для измерения поляризации протонов при столь низких энергиях было предложено использовать переход протонов в метастабильное состояние  $2S_{1/2}$ , для которого заселенности уровней сверхтонкой структуры зависят от поляризации протонов исходного пучка (Clausnitzer G., Fick D. NIM, 1967, 47, p.171).

В качестве мишени наиболее эффективно использовать пары цезия, для которого сечение перехода в метастабильное состояние достаточно велико. После нейтрализации пучок направляют в область с продольным магнитным полем  $B \approx 574$  Гс и поперечным электрическим полем  $E \approx 10$  в/см. В этой области метастабильные атомы в состояниях  $\beta$  (рис.4) переходят в основное состояние с высве-

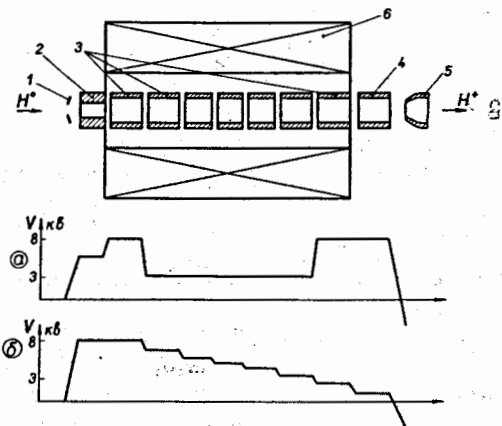


Рис. 3. Схема ионизатора с накоплением поляризованных ионов; а) распределение потенциала вдоль оси при накоплении и б) при вытягивании ионов.

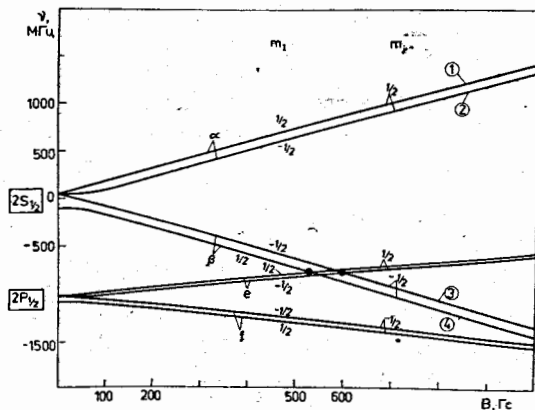


Рис. 4. Сверхтонкая структура уровней атома водорода  $2S_{1/2}$  и  $2P_{1/2}$  в магнитном поле.

чиванием фотонов с длиной волны  $1216 \text{ \AA}$ . Интенсивность излучения пропорциональна заселенности

$$N(\beta) = N(3) + N(4) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{P}{2} \left( 1 - \frac{x}{\sqrt{1+x^2}} \right) \right] \quad (2)$$

где  $x = V/V_c$ ,  $V$  - поле в области нейтрализации,  $V_c = 63,4$  Гс. Метастабильные атомы в состояниях  $\alpha$  попадают далее в область слабого магнитного и сильного электрического полей, где происходит переход их в основное состояние. Интенсивность излучения пропорциональна

$$N(\alpha) = N(1) + N(2) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{P}{2} \left( 1 - \frac{x}{\sqrt{1+x^2}} \right) \right] \quad (3)$$

Таким образом, измеряя интенсивность лаймановского излучения двумя счетчиками фотонов, получаем информацию о заселенности  $\alpha$ - и  $\beta$ -уровней состояния  $2S_{1/2}$ . Два сеанса измерений с включенным и выключенным РЧ-поляризатором (скорости счета  $n_1^+$ ,  $n_2^+$  и  $n_1^-$ ,  $n_2^-$  соответственно) дают два независимых значения поляризации протонов [5]:

$$P_1 = \frac{2}{c} \left( 1 - \frac{n_1^+}{n_1^-} \right), \quad (4)$$

$$P_2 = \frac{2}{c} \left( \frac{n_2^+}{n_2^-} - 1 \right),$$

где  $c = 1 - x/\sqrt{1+x^2}$ .

В силу возможных изменений эффективностей счетчиков эти результаты усредняют в соответствии со статистическими ошибками измерений. Если интенсивность пучка метастабильных атомов изменяется за время двух сеансов измерений, то поляризацию находят по формуле

$$P = \frac{2}{c} \frac{n_1^-/n_2^- - n_1^+/n_2^+}{n_1^-/n_2^- + n_1^+/n_2^+} \quad (5)$$

Чтобы определить эффективность работы РЧ-поляризатора, вычисляют поляризацию  $P_{ат}$  той части протонного тока, которая образовалась при ионизации атомного пучка. С этой целью дополнительно измеряют фоновые скорости счета  $n_1^{\Phi}$  и  $n_2^{\Phi}$  в отсутствие атомного пучка. Тогда

$$P_{ат} = P_1 \frac{n_1^-}{n_1^- - n_1^{\Phi}} = P_2 \frac{n_2^-}{n_2^- - n_2^{\Phi}} \quad (6)$$

Пучок поляризованных протонов на выходе ионизатора имеет продольную поляризацию. Вектор импульса протонов отклоняется в анализирующем магните на  $90^\circ$ . Вследствие аномального магнитного

протона его спин поворачивается при этом на угол  $90^\circ (g/2 - 1) = 161^\circ$  и измеряемая продольная компонента спина равна  $P_{||} = P \cos 161^\circ = -0,947 P$ .

Данный метод позволяет также измерять отдельно векторную и тензорную поляризацию пучка медленных дейтронов.

В третьей главе описана установка, созданная в ЛЯП ОИЯИ, и результаты экспериментов, проведенных на этой установке.

Молекулы водорода диссоциируют на атомы в высокочастотном разряде, который возбуждается в U-образной разрядной трубке, изготовленной из стекла пирекс. Автогенератор выполнен по схеме с заземленным катодом на двух тетрадах ГУ-80. Частота колебаний  $\approx 35$  МГц, анодное напряжение  $\approx 2$  кВ и анодный ток  $\approx 0,7$  А. Мощность передается в разряд через четвертьволновую линию, образуемую трубчатыми электродами, охватывающими плечи U-образной разрядной колбы. Электроды входят в нагрузочный контур автогенератора, что обеспечивает автоматическую перестройку частоты генератора при изменении режима разряда [6].

Атомы водорода выходят из разрядной трубки через отверстие, имеющее форму сопла без расширяющегося раструба. Геометрия системы формирования атомного пучка характеризуется следующими размерами: диаметр сопла 1,1 мм, диаметр коллиматора 2,5 мм, расстояния от сопла до коллиматора и разделительного магнита равны 37 и 50 мм, соответственно. Установка сепаратора не дала существенных преимуществ.

Секступольный разделительный магнит имеет спроектированную вдоль оси апертуру. На первом участке длиной 287 мм апертура возрастает линейно от 3 до 12 мм, на втором - длиной 257 мм, апертура постоянна и составляет 12 мм. Измеренная величина магнитного поля составляет при  $2r_m = 12$  см,  $B_m = 6$  кГс. Камера сопла и камера разделительного магнита откачивались соответственно вакуумными агрегатами ВА-5-4 и ВА-8-4 с азотными ловушками.

Интенсивности пучков атомов и молекул на выходе секступольного магнита определялись по приросту давления над фоном в стеклянной ловушке, соединенной с компрессионной трубкой, которая захватывает пучок частиц, при помощи ионизационного вакуумметра ВИТ-3. Ловушка охлаждалась жидким азотом. Поперечные размеры пучка атомов водорода на различных расстояниях от секступольного магнита визуализировались при помощи  $\text{MoO}_3$ , нанесенного на стеклянную пластинку.

В разработанном ИПИ используется система РЧ-переходов в сла-

бом магнитном поле /7/. Атомный пучок проходит внутри кварцевой трубки, на которой укреплена катушка индуктивности, создающая радиочастотное магнитное поле. Постоянное магнитное поле создается магнитом с изменяющимся вдоль пути пучка межполюсным зазором. Рассеянное поле электромагнита ионизатора в месте расположения РЧ-поляризатора составляет сотни Гс. Поэтому постоянный магнит вместе с катушкой индуктивности был заключен в двойной магнитный экран из железа армко.

На рис. 6 приведена схема ионизатора пучка поляризованных атомов водорода /8/. Анодный электрод 3 длиной 20 см изготовлен из тонкостенной трубки из нержавеющей стали с внутренним диаметром 2 см. Продольное магнитное поле создается соленоидом 5 длиной 26 см, возбуждаемым током до 200 А от мотора-генератора. При токе возбуждения 100 А магнитное поле в центре соленоида равно 1,6 кГс и в месте расположения нити накала - 1,1 кГс. Объем ионизатора откачивается геттерионным насосом ГИН-0,5. Существенным элементом ионизатора является ловушка 4, заполняемая жидким азотом. Ловушка находится под потенциалом земли и имеет тепловой контакт с анодным электродом через стеклянную трубку толщиной 1 мм. Ионный ток измерялся несколькими датчиками:

$I_{\Phi 1}$  - датчиком II, расположенным на расстоянии 40 см от анода,

$I_{\Phi 2}$  - датчиком, находящимся на 130 см от анода,

$I_{\Phi 3}$  - после магнитного анализатора,

$I_1, I_2, I_3$  - электродами ионизатора 6, 7 и 8.

Конструкция поляриметра /5/ схематически показана на рис. 6. Протоны, выходящие из ионизатора 3, отклоняются на угол  $90^\circ$ , фокусируются линзой 5 и проходят через паровую цезиевую мишень 6. Пучок метастабильных атомов попадает в область магнитного поля 400-600 Гс, создаваемого катушками Гельмгольца I3, и электрического поля  $\approx 10$  В/см, создаваемого конденсатором I5. Высвечиваемые в этой области фотоны регистрируются первым фотонным счетчиком I6. Вторая пара гасящих электродов I7, создающих поле  $\approx 100$  В/см, помещена ниже по пучку в области слабого магнитного поля. Второй фотонный счетчик I8 "видит" эту область гашения.

В экспериментах с атомным пучком измерялись следующие величины: интенсивность пучка атомов или молекул на выходе секступольного магнита, степень диссоциации молекул в потоке, выходящем из диссоциатора, а также разряжение в различных отсеках установки в зависимости от потока водорода через сопло. Интенсивность пучка по-

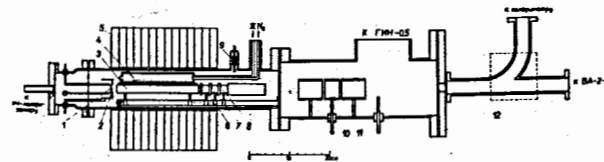


Рис. 5. Общая схема ионизатора: I - нить накала (катод); 2 - сетка; 3 - анодный электрод, 4 - азотная ловушка, 5 - электромагнитный соленоид, 6 - первый электрод, 7 - второй электрод, 8 - третий электрод, 9 - высоковольтный ввод, 10 - одиночная электростатическая линза, II - датчик тока  $I_{\Phi 1}$ , I2 - анализирующий электромагнит.

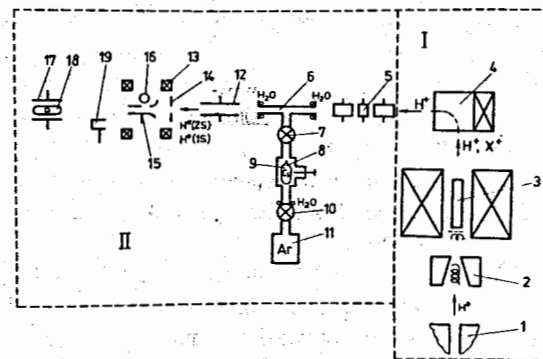


Рис. 6. Схема экспериментальной установки для измерения поляризации; I - источник поляризованных протонов (показан частично), II - поляриметр.

ляризованных атомов определялась при включенном диссоциаторе по разности давлений в ловушке в двух измерениях (с включенным и выключенным секступольным магнитом):

$$F_{H_1} = c(H_1) \Delta P_{\text{лов}}(H_1) = c(H_1) [\Delta P_{\text{лов}}(H_1 + H_2) - \Delta P_{\text{лов}}(H_2)], \quad (7)$$

где  $c(H_1)$  - калибровочный коэффициент.

Степень диссоциации водорода  $\xi$  в потоке газа на выходе из сопла, равная по определению  $\xi = F_{H_1} / (F_{H_1} + 2 F_{H_2})$ , связана с непосредственно измеряемой величиной

$$\mathcal{K} = \frac{\Delta P_{\text{лов}}(H_1)}{\Delta P_{\text{лов}}(H_1 + H_2)} \quad (8)$$

соотношением

$$\xi = \mathcal{K} \frac{\Omega_1}{\Omega_2 - \Omega_1}, \quad (9)$$

где  $\Omega_1$  - геометрический телесный угол, под которым видна компрессионная трубка,  $\Omega_2$  - аксептанс разделительного магнита для неполяризованного пучка.

На рис. 7 даны значения интенсивностей пучков атомов и молекул на расстоянии 20 см от разделительного магнита, а также величины  $\mathcal{K}$  в функции давления  $p_0$  в диссоциаторе. Максимальный поток поляризованных атомов, равный  $3,2 \cdot 10^{15}$  ат/с, достигается при давлении  $p_0 = 0,5$  Тор, на расстоянии 5 см от магнита поток, захватываемый компрессионной трубкой, равен  $4 \cdot 10^{15}$  ат/с. Степень диссоциации имеет максимум при давлении водорода 0,2 Тор, а при

$$p_0 = 0,5 \text{ Тор}, \quad \xi = 0,5 \xi_{\text{макс.}}$$

Ожидаемая интенсивность поляризованных атомов для  $\xi = 1$ ,

$p_0 = 0,5$  Тор,  $T_0 = 400$  К и аксептанса  $\Omega_2 = 1,5 \cdot 10^{-3}$  равняется  $1,5 \cdot 10^{16}$  атомов/с. Из рис. 7 и соотношения (9)  $\xi_{\text{макс.}} \approx 0,6$ , следовательно,  $\xi(0,5 \text{ Тор}) \approx 0,3$ . С учетом этого фактора теоретическое значение хорошо согласуется с измеренной величиной потока. Максимальная интенсивность молекулярного пучка достигается при  $p_0 \approx 2$  Тор и составляет  $1,3 \cdot 10^{15}$  мол/с.

Основными параметрами, характеризующими работу ионизатора Пеннинга, являются: ток эмиссии катода, величина магнитного поля, давление остаточного газа и потенциал анодного электрода. В большинстве опытов потенциал катода  $U_k = 0$ , потенциал сетки  $U_c = 300$  В, потенциалы 1-го, 2-го и 3-го электродов, соответственно,  $U_1 = -600$  В,  $U_2 = -400$  В и  $U_3 = 0$ . Изменение тока эмиссии слабо влияет на величину ионного тока и энергию ионов в диапазоне

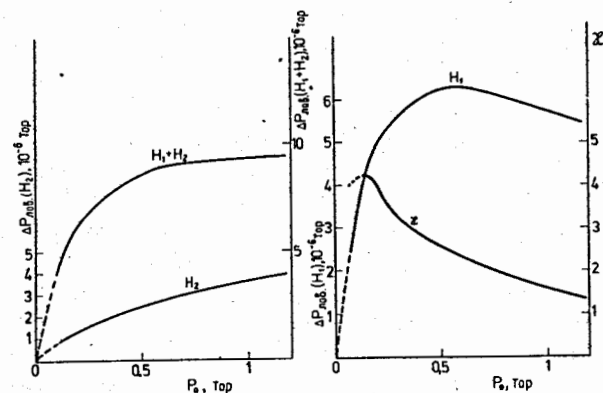


Рис. 7. Зависимость потоков атомов и молекул и величины  $\mathcal{K}$  от давления в диссоциаторе;  $c(H_1) = 5 \cdot 10^{20}$  атомов/с Тор,  $c(H_2) = 2,5 \cdot 10^{20}$  мол/с.Тор.

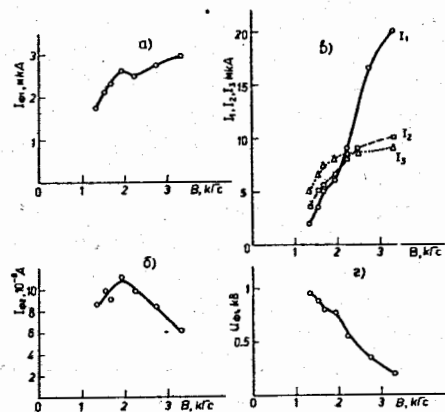


Рис. 8. Зависимость от магнитного поля ионизатора: а) тока  $I_{\Phi 1}$ ; б) тока  $I_{\Phi 2}$ ; в) токов на электродах 1, 2 и 3; г) оптимального напряжения на фокусирующей линзе; ( $U_a = 2$  кВ,  $I_k = 740$  мкА,  $p = 10^{-6}$  Тор).



0,1±2 мА. В типичном режиме работы ионизатора  $I_k \approx 0,7$  мА, а ток в цепи анода  $I_a \approx 0,2$  мА. На рис. 8 даны интенсивности ионов, выходящих из разряда, измеренные различными датчиками ( $I_{\Phi 1}$ ,  $I_{\Phi 2}$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ), в зависимости от магнитного поля. Измерения энергии ионов были проведены при двух значениях магнитного поля в центре соленоида: 1,3 и 2,8 кГс. Соответствующие им провисания потенциала на оси анода равны 0,6 и 1,5 кВ. Таким образом, эффект осцилляций электронов внутри анодного цилиндра усиливается с ростом магнитного поля. Остаточное давление в этих экспериментах равнялось  $\approx 10^{-6}$  Тор. Стоит ему повыситься до  $\approx 4 \cdot 10^{-6}$  Тор, как ионный ток уменьшается в несколько раз, а энергия ионов возрастает до величины, близкой к потенциалу анодного электрода.

Ток поляризованных протонов при  $B = 2$  кГс равен 2 мкА при  $U_a = 2,5$  кВ и 2,4 мкА при  $U_a = 3$  кВ. Ток протонов распределяется примерно поровну между четырьмя датчиками, измеряющими токи  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  и  $I_{\Phi 1}$ . При измерении интенсивности пучка ионов был учтен эффект вторичной электронной эмиссии. Интенсивность атомного пучка, проходящего через ионизатор, составляет  $4 \cdot 10^{15}$  ат/с, диаметр сечения — 1,6 см, средняя скорость атомов  $\bar{v} = 2,4 \cdot 10^5$  см/с, а число атомов в 1 см<sup>3</sup>  $n_{ат} = 8 \cdot 10^9$  ат/см<sup>3</sup>. Это соответствует парциальному давлению атомов в пучке  $3 \cdot 10^{-7}$  Тор. Измеренная эффективность ионизации для  $U_a = 3$  кВ,  $\eta_{эксп} = 4 \cdot 10^{-3}$ , что согласуется с теоретической оценкой  $\eta_{теор} = 3 \cdot 10^{-3}$ , полученной для электронного тока 5,3 А.

На рис. 9 показаны скорости счета первого и второго фотонных счетчиков поляриметра в зависимости от магнитного поля в центре катушек Гельмгольца (для неполяризованного пучка)<sup>1/5</sup>. Эффективное гашение  $\beta$ -уровней метастабильного состояния  $2S_{1/2}$  начинается при магнитном поле около 400 Гс. При магнитном поле выше  $\approx 540$  Гс эффективный объем гашения передвигается вверх по пучку, первый фотонный счетчик перестает видеть эту область, и поэтому скорость счета его уменьшается. Второй фотонный счетчик реагирует на высвечивание  $\alpha$ -уровней, которые тушатся сильным электрическим полем. Как видно из рис. 9, скорость счета второго фотонного счетчика при магнитном поле 500 Гс равна половине скорости счета при  $B = 0$ . Именно такое соотношение должно иметь место для неполяризованного пучка протонов.

Радиочастотный поляризатор был испытан в различных режимах /7/. Эффективность его работы определялась степенью поляризации

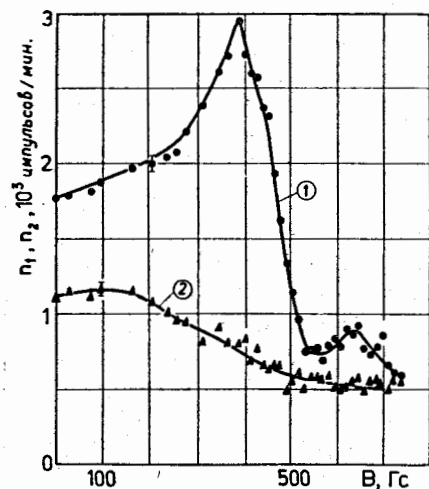


Рис. 9. Скорость счета первого (1) и второго (2) фотонных счетчиков в зависимости от магнитного поля в центре катушек Гельмгольца.

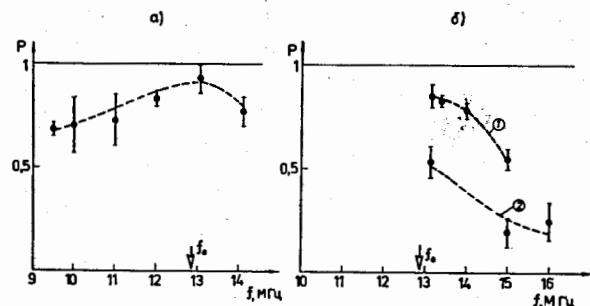


Рис. 10. Зависимость поляризации протонов в атомном пучке от частоты и амплитуды радиочастотного поля.

протонов в атомном пучке,  $P_{ат}$ , измеряемой поляриметром. На рис. 10а приведены значения степени поляризации протонов в атомном пучке, измеренные при различных частотах генератора и одной и той же амплитуде  $V_1 = 1,2$  Гс. Максимальное значение поляризации, равное  $P_{ат} = - (0,90 \pm 0,07)$ , свидетельствует об эффективной работе РЧ-поляриметра и согласуется с оценкой фона неполяризованных атомов пучка, равной  $\approx 0,05$ .

На рис. 10б даны результаты измерений, выполненных с другой катушкой индуктивности. Кривая 1 соответствует  $V_1 = 0,5$  Гс, а кривая 2 -  $V_1 = 0,2$  Гс. Видно, что нарушение условия адиабатичности приводит к уменьшению степени поляризации протонов.

Четвертая глава содержит анализ процессов деполяризации частиц при ускорении их в циклических ускорителях промежуточных энергий, а также численные расчеты деполяризации протонов для высокоэнергетического фазотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Деполяризация пучка с начальной поляризацией  $\vec{P}(t_0) = \vec{P}_0$  по определению равна

$$D = \frac{|\vec{P}_0| - |\vec{P}(t)|}{|\vec{P}_0|} \quad (10)$$

Это соотношение учитывает, что изменение одного только направления вектора поляризации еще не дает деполяризации пучка. Действительно, при помощи магнитного поля всегда можно восстановить первоначальное направление вектора поляризации. Деполяризация наступает только тогда, когда изменяется абсолютное значение вектора поляризации.

Рассмотрение ведется на основе классического релятивистского уравнения движения спина (Вагдманн V. e. a. P.R.L., 1959, 2, p. 435):

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \frac{e}{m\gamma} \vec{S} \times [\vec{B} + G(\vec{B}_{||} + \gamma \vec{B}_{\perp})], \quad (11)$$

где  $G = \frac{g-2}{2}$ , для протонов  $G = 1,793$ , скорость света принята равной 1,  $\gamma$  - релятивистский фактор; влиянием электрического поля пренебрегается.

Существенная деполяризация может возникнуть, если частицы при ускорении пересекают область резонанса, где частота прецессии спина равняется частоте вращения горизонтальных компонент магнитного поля. Наиболее общее условие возникновения резонансов для протонов записывается в виде

$$-1,793\gamma \pm m\nu_z \pm n\nu_r \pm \ell = 0, \quad (12)$$

$m, n, \ell = 0, 1, 2, \dots$ ,  $\nu_z$  и  $\nu_r$  - числа вертикальных и горизонтальных колебаний на оборот. После прохождения резонанса вертикальная составляющая спина равна

$$S_z = 2 \exp\left(-\frac{|A|^2 \lambda^2}{4}\right) - 1, \quad (13)$$

где  $A$  пропорциональна резонансной компоненте горизонтального магнитного поля;  $\lambda$  - ширина резонанса, обратно пропорциональная корню квадратному из величины набора энергии за оборот, для установки "Ф"  $\lambda = 7,2 \cdot 10^2$ .

Для вычисления радиальных и азимутальных составляющих магнитного поля установки "Ф" были использованы проектные характеристики магнитного поля в медианной плоскости:

$$B_z(r, \theta) = B(r) \left[ 1 + \epsilon(r) \sin\left(\frac{z}{\lambda} - 4\theta\right) \right] \quad (14)$$

Сильные резонансы связаны с искажениями медианной поверхности на 1-й, 2-й и 3-й гармониках  $1/9$ . Из (12) находим два резонансных условия:

$$\begin{aligned} 1,793\gamma &= 2 & \gamma(1) &= 1,116 \\ 1,793\gamma &= 3 & \gamma(2) &= 1,673 \end{aligned} \quad (15)$$

Первый резонанс происходит при  $R = 120,6$  см, ширина по радиусу  $\Delta R = 4,5$  см. В таблице I приведена деполяризация  $D$  для различных значений  $B_{r2}$  и  $B_{\theta 2}$ .

Таблица I

$B_{r2}$ , Гс	$B_{\theta 2}$ , Гс	$D$
0,4	0,2	0,007
0,7	0,45	0,06
1,4	0,9	0,1
2,2	1,3	0,2
2,9	1,8	0,4
5,1	3,1	1,0

Для второго резонанса важны значения 1-й и 3-й гармоник  $B_z$  и  $B_{\theta}$  на радиусе 259,6 см,  $\Delta R = 1,9$  см. Результаты расчета деполяризации приведены в таблице 2.

Были учтены также резонансы связи между бетатронными вертикальными и горизонтальными колебаниями, между бетатронными радиальными и вынужденными вертикальными колебаниями. Их общий вклад в деполяризацию составляет  $D \approx 0,06$ . Деполяризация в

системе вывода из регенератора и возбуждителя  $D \approx 0,013$ .

Таблица 2.

$V_{\tau 1}$	$V_{\tau 2}$	$V_{\tau 3}$	$D$
0,3	0,3	0,06	0,006
0,7	0,7	0,1	0,025
1,3	1,3	0,25	0,1
2	2	0,4	0,2
3	3	0,5	0,4
4	4	0,75	0,9

Основные результаты, полученные в диссертации, можно сформулировать следующим образом:

1. Разработан и построен источник поляризованных протонов, предназначенный для сильноточного фазотрона Лаборатории ядерных проблем ОИИИ.

2. Технико-физические характеристики источника поляризованных протонов определяются следующими параметрами: интенсивность пучка поляризованных протонов -  $1,5 \cdot 10^{13}$  п/с или ток - 2,4 мкА; степень поляризации  $P = 0,90 \pm 0,07$ .

3. Теоретический анализ процессов, происходящих в ИПИ, позволил рассчитывать предельное число Маха, до которого ускоряется поток из диссоциатора. Обоснованы преимущества разделительного магнита с профилированной апертурой и с помощью ЭВМ вычислен аксептанс секступольного магнита с линейно увеличивающейся вдоль оси апертурой.

4. Экспериментальные исследования, выполненные на данной установке, показали, что наблюдается хорошее согласие с теорией сверхзвукового истечения из сопла Лавала. Максимальный поток поляризованных атомов достигается при давлении  $H_2$  в диссоциаторе 0,5 Тор и равен  $4 \cdot 10^{15}$  атомов/с на выходе секступольного магнита. Выявлены факторы, ограничивающие интенсивность, главными из которых являются рассеяние атомного пучка на остаточном газе в первой секции системы формирования атомного пучка и понижение степени диссоциации при давлении водорода в диссоциаторе выше 0,5 Тор.

5. Экспериментальное исследование процессов в ионизаторе позволяет сделать следующие выводы: электронный ток, осциллирующий в разряде Пеннинга, составляет около 5 А и близок к предельному

значению для потенциала анодного электрода, равного 3 кВ; наблюдается монотонный рост эффективности ионизации с увеличением магнитного поля в ионизаторе; измеренная эффективность ионизации в разряде Пеннинга составляет  $\approx 4 \cdot 10^{-3}$  и близка к наивысшим показателям, описанным в литературе.

6. Впервые в мире разработан и изготовлен измеритель поляризации медленных ионов с использованием лэмбовского сдвига, который позволяет оперативно измерять степень поляризации протонов непосредственно на выходе ионизатора источника поляризованных протонов. При помощи такого поляриметра были исследованы характеристики радиочастотного поляризатора и доказана высокая эффективность его работы. Поляриметр может быть применен для раздельного измерения векторной и тензорной поляризации дейтронов.

7. Выполнен теоретический анализ процессов деполяризации частиц при ускорении в циклических ускорителях. Расчеты показали, что для сохранения поляризации протонов на уровне  $0,6 + 0,7$  в сильноточном фазотроне Лаборатории ядерных проблем ОИИИ достаточно ослабить первую, вторую и третью азимутальные гармоники радиальных компонент магнитного поля в плоскости ускорения до следующих значений:

$$V_{\tau 1} \leq 1,5 \text{ Гс на радиусе } (260 \pm 1) \text{ см,}$$

$$V_{\tau 2} \leq 2 \text{ Гс на радиусе } (121 \pm 2,5) \text{ см,}$$

$$V_{\tau 3} \leq 1,5 \text{ Гс на радиусе } (260 \pm 1) \text{ см.}$$

8. Дан анализ методов накопления поляризованных ионов в линейном электронном пучке и электронном кольце коллективного ускорителя (кольцетрона).

Для установки "Ф" при использовании ионизатора-накопителя ожидается импульсный ток поляризованных протонов до 1,2 мА (в течение 20 мкс), что даст средний выведенный ток для ускоренного пучка до 0,3 мкА. Рассмотрена проблема сохранения поляризации при накоплении.

Основные результаты, изложенные в диссертации, были доложены на IV Международной конференции по ускорителям (Дубна, 1963), на III региональной конференции по физике и технике низких температур (Прага, 1963), на IX Международной конференции по явлениям в ионизированных газах (Бухарест, 1969) и опубликованы в работах /I-9/.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Плис Ю.А., Сороко Л.М. ОИИИ, Р9-10312, Дубна, 1976.
2. Плис Ю.А. ОИИИ, Р-1681, Дубна, 1964.
3. Донец Е.Д., Плис Ю.А. ОИИИ, Р9-5446, Дубна, 1970.
4. Ланидус Л.И., Плис Ю.А. и др. ОИИИ, Р1-5209, Дубна, 1970.
5. Плис Ю.А., Сороко Л.М. ПТЭ, 1977, № 3, с.44.
6. Плис Ю.А. и др. ОИИИ, Б1-9-7470, Дубна, 1973.
7. Плис Ю.А., Сороко Л.М. ОИИИ, Р9-9945, Дубна, 1976.
8. Плис Ю.А., Сороко Л.М. ОИИИ, Р9-10413, Дубна, 1977.
9. Плис Ю.А., Сороко Л.М., ОИИИ, 9-4672, Дубна, 1969;  
АЭ, 1970, 29, с.122.

Рукопись поступила в издательский отдел  
6 апреля 1978 года.