

Рис. 2. Схема устройства для конверсии электронов в позитроны:

1 — твердый конвертер; 2 — газовая мишень первого варианта; 3 — пучок электронов с энергией 6 Мэв; 4 — линии магнитного поля; 4а, 4б — магнитные пробки; 5 — потенциометр для продольного отсасывающего электрического поля; 6 — система для создания резкого перепада давления откачкой или вымораживанием; 7 — электроды для ускорения медленных позитронов до 10 кэв; 8 — разреженная газовая ловушка второго варианта; 9 — электростатические пробки для удержания медленных позитронов; 10 — система быстрого отсоса и ускорения накопленных позитронов; 11 — система магнитных жалюзей, замыкающая магнитное поле, для выпуска позитронов в пространство; 12 — пучок позитронов.

конверсии можно получить ток позитронов порядка  $10^{-6}$  а.

На рис. 1 изображена схема соответствующего устройства, а на рис. 2 — схема устройства для конверсии электронов в позитроны.

Длина каждой ловушки  $\sim 1$  м. Давление в первой ловушке 100 торр (аргон или ксенон), во второй — менее 1 торр. Коэффициент кон-

версии электронов в мишени 1 (см. рис. 2) в позитроны тех энергий, которые могут быть замедлены в газе, с учетом запусывания позитронов в магнитных ловушках порядка  $3 \cdot 10^{-5}$ . Время накопления во второй ловушке порядка 1 мсек; необходимое время для инжекции в синхротрон  $3 \cdot 10^{-8}$  сек; отношение времен  $3 \cdot 10^4$ ; коэффициент конверсии  $\sim 1$ . Таким образом, рассмотренное выше устройство позволяет инжектировать позитроны с энергией 3 Мэв и током 1 а, превышающим ток электронов в обычных синхротронах и совпадающим с предельным током электронов ускорителя Б-3М Института ядерной физики СО АН СССР.

При бoльшей начальной энергии электронов коэффициент конверсии резко возрастает и ток позитронов начинает ограничиваться законом Ленгмюра или плазменными явлениями.

Нами разработан макет преобразователя электронов в позитроны, на котором в ближайшее время начнутся эксперименты.

**Примечание при корректуре.** После данного сообщения на конференции во Фраскати нам стало известно, что аналогичный метод получения узкого моноэнергетического пучка позитронов путем замедления быстрых позитронов в газе был предложен П. П. Денисовым, П. А. Черенковым и А. М. Громовым в конце 1964 г. (не опубликовано).

Одновременно нам стало известно, что в феврале 1965 г. К. Робинзоном была выдвинута идея накопления позитронов в высоковакуумной магнитной ловушке с использованием радиационного затухания (Preprint CEAL-1016).

## V. Эксперименты по перезарядной инжекции протонов в накопители

Г. И. Будкер, Г. И. Димов, А. Г. Попов, Ю. К. Свиридов, Б. Н. Сухина, И. Я. Тимошин

В августе 1964 г. на экспериментальной установке \*, схема которой приведена на рис. 1, была осуществлена перезарядная инжекция протонов в кольцевой накопитель.

Первые эксперименты проводились на слабофокусирующем накопительном кольце с апертурой  $8 \times 4$  см и радиусом орбиты 42 см. В качестве ионизирующей мишени использовалась водородная струя, направленная по радиусу от центра кольца и включаемая с помощью электродинамического затвора на время

от 300 до 600 мксек. Поперечный размер струи на орбите  $\sim 1$  см. Выход протонов на орбиту

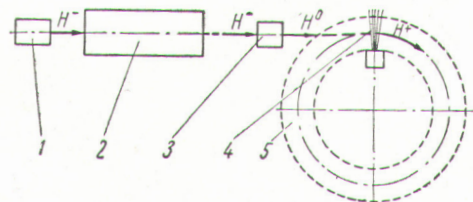


Рис. 1. Схема установки для перезарядной инжекции протонов в накопитель:

1 — источник отрицательных ионов водорода; 2 — ускоритель; 3 — входная газовая мишень; 4 — водородная струя на орбите; 5 — накопительное кольцо.

\* Г. И. Будкер, Г. И. Димов. В кн. «Труды Международной конференции по ускорителям (Дубна, 1963)». М., Атомиздат, 1964, стр. 993.

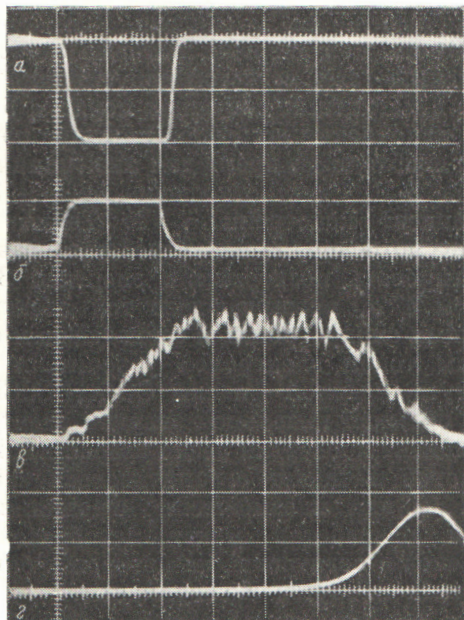


Рис. 2. Осциллограммы тока при инжекции протонов в накопитель в квазибетатронном режиме:

*а* — импульс тока перед нейтрализующей мишенью; *б* — импульс тока протонов на выходе из ионизирующей мишени; *в* — сигнал с ФЭУ; *г* — импульс тока протонов с внутренней мишени. Масштаб по горизонтали 10 мксек/см.

растет с увеличением плотности струи. Контроль протонного пучка на первом обороте показал, что он расходится при выходе из ионизирующей мишени из-за ее конечной толщины, расширяется по радиусу до 4,7 см через четверть длины волны радиальных бетатронных колебаний и фокусируется до перво-

начального поперечного размера в 3—4 мм через половину длины волны. Вертикальный поперечный размер пучка на первом обороте (3—4 мм) практически не изменяется, сколько-нибудь заметные потери протонов отсутствуют.

При перезарядной инжекции в накопитель без ускоряющего поля (квазибетатронный режим) протоны двигаются по свертывающейся спирали из-за потерь энергии в струе. Накопление протонов в этом режиме наблюдалось по интенсивности свечения водородной струи, регистрируемого ФЭУ, а также с помощью широкополосных индукционных электродов и мишени у внутренней стенки кольцевой камеры. Для энергии протонов 1 Мэв и длительности инжекции 20 мксек (100 оборотов) на рис. 2 представлены осциллограммы тока отрицательных ионов перед нейтрализующей мишенью (*а*), тока протонов из ионизирующей мишени (*б*), интенсивности свечения струи и протонного тока с внутренней мишени (*г*). По осциллограмме свечения струи и соответствующего сигнала с индукционных электродов видно, что в течение 100 оборотов, когда пучок вводится в накопитель, ток на орбите линейно нарастает, а затем в течение ~150 оборотов остается постоянным. В этот период радиус орбиты сокращается (что наблюдалось с помощью вертикальных индукционных электродов), но пучок еще не достигает внутренней мишени. Затем пучок попадает на внутреннюю мишень. Заряд, попадающий на внутреннюю мишень, в 100 раз превышает заряд протонного пучка на первом обороте. Амплитуда сигнала от индукционных электродов при накоплении также в 100 раз

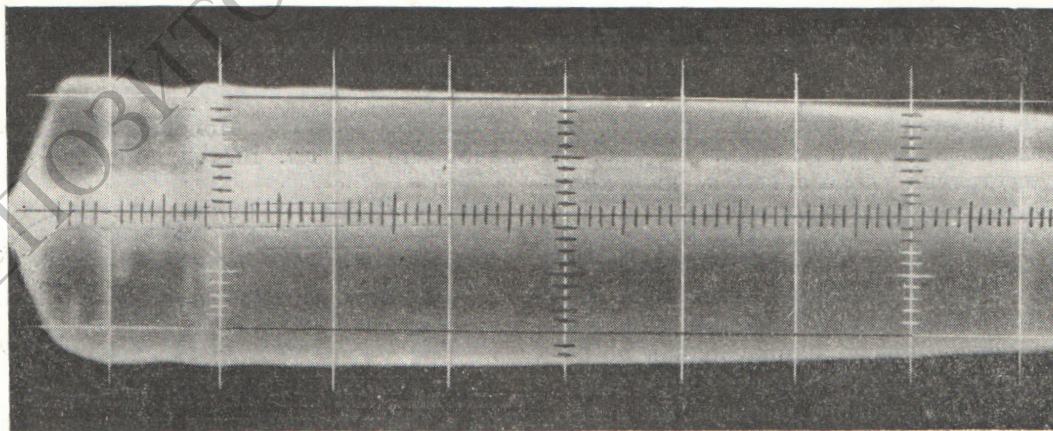


Рис. 3. Осциллограмма сигнала с индукционных электродов при инжекции в резонансный режим.

Масштаб по горизонтали 500 мксек/см.

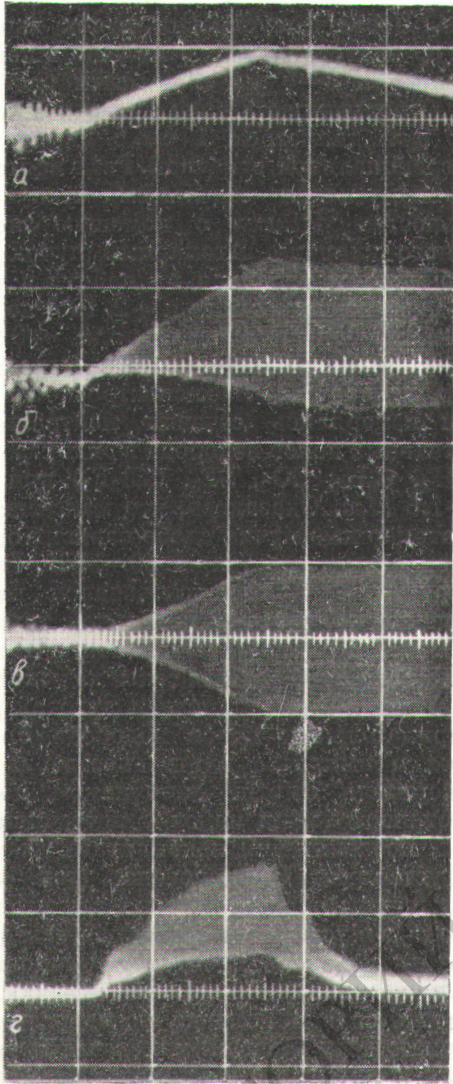


Рис. 4. Осциллограммы, характеризующие захват в резонансный режим.  
Масштаб по горизонтали 10 мксек/см.

превышает сигнал при введенной заслонке в конце первого оборота. Точность этих измерений  $\sim 10\%$ . Сигнал ФЭУ, регистрирующего свечение струи, при накоплении возрастает только в 40–50 раз, что, по-видимому, связано с различием в поперечном распределении накопленного протонного тока и тока первого оборота. Аналогичные соотношения получаются при инъекции до 250 оборотов. Таким образом, при перезарядной инъекции в квазибетатронный режим эффективность инъекции близка к 100%.

Была осуществлена перезарядная инъекция протонов в резонансный режим при амплитуде ускоряющего напряжения до 6 кВ и кратности частоты, равной 1. В этом режиме ускоряющее ВЧ-поле компенсирует потери энергии протонов на ионизацию. На рис. 3 приведена осциллограмма сигнала с резонансных индукционных электродов при инъекции в резонансный режим протонов с энергией 1 МэВ в течение 1500 оборотов (время инъекции 300 мксек); ускоряющее напряжение было равно 4,5 кВ. На рис. 4 представлены осциллограммы, характеризующие захват в резонансный режим (энергия 1 МэВ, время инъекции 20 мксек). Две первые осциллограммы (см. рис. 4, а, б) представляют собой сигнал с широкополосных индукционных электродов без ускоряющего поля и с ускоряющим ВЧ-полем. Из сравнения величин сигналов следует, что линейная плотность захваченных в резонансный режим протонов в центре сгустка в 1,5 раза превосходит плотность накапливаемых протонов в квазибетатронном режиме. На третьей осциллограмме (см. рис. 4, в) приведен сигнал с резонансных индукционных электродов, на четвертой (см. рис. 4, г) — с внутренней мишени при накоплении в резонансном режиме. Сравнение последней осциллограммы с сигналом с внутренней мишени при инъекции в квазибетатрон (см. рис. 2) показывает, что в отличие от квазибетатронного режима при захвате протонов в резонансный режим имеют место примерно постоянные потери частиц. При этом протоны уходят в основном

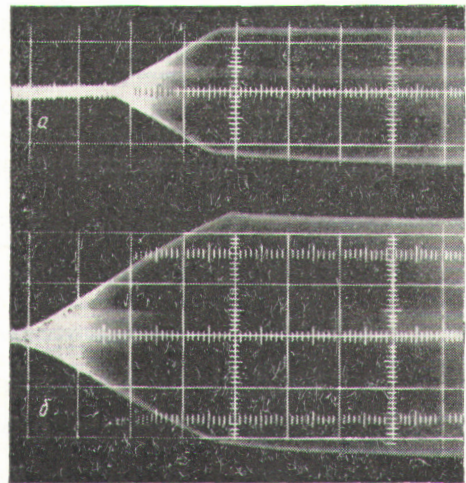


Рис. 5. Осциллограммы, характеризующие захват протонов в резонансный режим за 500 (а) и 1000 (б) оборотов.

Масштаб по горизонтали 50 мксек/см.

во внутреннюю часть кольца (сигнал с наружной мишени во много раз меньше). Потери частиц при инжекции в резонансный режим составляют 20—25%. На рис. 5 приведены осциллограммы сигналов с резонансного индукционного электрода при накоплении протонов в резонансном режиме за 500 и 1000 оборотов (энергия 1 Мэв). Накопленный ток в резонансном режиме растет линейно со временем.

В наших экспериментах использовалась толщина водородной струи  $\sim 10^{17}$  атом/см<sup>2</sup>, полное сечение потерь протонов из-за рассеяния на водороде равнялось  $4,5 \cdot 10^{-22}$  см<sup>2</sup>/атом, а эффективное число оборотов инжекции с учетом раскачки колебаний за счет ионизационных потерь энергии в струе составляло  $\sim 5000$ . При инжекции до 1500 оборотов потери частиц не должны превышать нескольких процентов, поэтому в экспериментах мы не могли зарегистрировать роста потерь в процессе накопления. Постоянные же потери 20—25% частиц при инжекции в резонансный режим достаточно хорошо согласуются с сокращением азимутального размера сепаратрисы из-за потерь энергии.

В первых экспериментах был использован высокочастотный источник отрицательных ионов водорода с максимальным постоянным током 21 мка при мощности 400 вт. Система вытягивания ионов беззондовая, вытягивающее напряжение достигало 12 кв. Особенностью такого источника является запирание вторичных электронов в перезарядном канале вытягивающего электрода напряжением 250—300 в. С этим источником от ускорителя Ван де Граафа был получен пучок отрицательных ионов водорода интенсивностью до 12 мка. В накопитель пучок подводился импульсами длительностью 1—300 мксек, получаемыми с помощью отсекающего конденсатора, установленного в ионо-

проводе. После фокусировки пучок вводился в газовую нейтрализующую мишень с поперечным размером 3—4 мм и угловым раствором  $2 \cdot 10^{-3}$ , выполненную в виде проточной трубки длиной 5 и диаметром 1 см с диафрагмами и дифференциальной откачкой. Газ в проточную трубку напускался отдельными импульсами длительностью 1 мсек с помощью электромагнитного клапана. Атомарный пучок водорода из мишени вводился на орбиту с точностью  $\pm 1$  мм по положению и  $\pm 2 \cdot 10^{-3}$  по углу. Стабильность энергии составляла  $\pm 0,2\%$ .

Для получения максимального выхода атомарного пучка нами масс-спектроскопическим методом измерялись сечения нейтрализации отрицательных ионов водорода в ряде газов (H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, CO<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub>, CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) при энергии 1—1,5 Мэв. Оказалось, что максимальный выход атомарного пучка слабо зависит от вида газа и энергии и составляет 50—55%. В нейтрализующей мишени использовался водород или углекислый газ с оптимальной толщиной  $2,5 \cdot 10^{16}$  и  $3 \cdot 10^{15}$  молекул/см<sup>2</sup> соответственно.

Для накопления больших токов на ускорителе Ван де Граафа был установлен дуговой источник отрицательных ионов водорода с током до 1 ма в импульсе длительностью 1 мсек. От ускорителя с этим источником получен пучок отрицательных ионов с интенсивностью 800 мка, позволяющий накапливать на орбите нашей установки  $10^{12}$  протонов (ток  $\sim 1$  а).

К сожалению, авария на ускорителе (прорыв сжатого газа в ускорительную трубку) задержала проведение экспериментов по накоплению больших протонных токов, хотя все для этого было подготовлено. Тем не менее результаты предварительных экспериментов не вызывают сомнения в том, что в ближайшее время будет накоплен ток, лимитируемый пространственным зарядом.



УДК 621.039.6:533.9

## К вопросу о возможности самоподдерживающейся термоядерной реакции в ловушке с магнитными пробками

Д. В. Сивухин

Рассмотрен энергетический баланс в различных вариантах термоядерного реактора, в котором используется ловушка с магнитными пробками. Учтены только потери энергии, связанные с уходом частиц

через магнитные пробки. Наиболее вероятно, что самоподдерживающуюся термоядерную реакцию в ловушке с магнитными пробками получить невозможно.