

## УСТАНОВКА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

М.Э. Вейс, Г.С. Крайнов, Н.К. Куксанов,  
Б.М. Корабельников, С.А. Кузнецов, И.Н. Мешков,  
П.И. Немытов, Р.А. Салимов, А.Н. Скринский,  
Б.М. Смирнов, А.Н. Шарапа, А.В. Шемякин  
Институт ядерной физики СО АН СССР  
Новосибирск, 630090

Развитие методов охлаждения пучков тяжелых заряженных частиц<sup>1,2</sup> показало перспективность применения электронного охлаждения в области энергий антинейтрона от десятков порядков нескольких ГэВ/нуклон. В связи с этим в ИЯФ СО АН СССР начаты работы по созданию установки, предназначенной для отработки параметров пучка и узлов системы электронного охлаждения на энергию электронов до 1 МэВ при токе в пучке 1 ÷ 10 А. Одновременно подобное устройство позволяет провести исследование работы ускорительных электронных трубок с пучком, имеющим указанные параметры, что позволит в дальнейшем создавать на их основе ускорители прямого действия с мощностью в пучке выше 1 МВт. Такие ускорители представляют значительный интерес для различных промышленных и технических применений.

В установке использована естественная для систем электронного охлаждения схема рекуперации энергии электронного пучка<sup>3</sup>, что позволяет снизить на три порядка уровень активной (потребляемой) мощности.

К установкам электронного охлаждения применяются специфические и довольно жесткие требования<sup>2</sup>: высокий вакуум (порядка  $10^{-10}$  Торр), большая длина промежутка охлаждения (до 100 м в проекте<sup>4</sup>), малые поперечные скорости электронов ( $v_{\perp}/v_{\parallel} \sim 10^{-3}$ ), продольное (сопровождающее) магнитное поле высокой однородности. Большинство этих задач экспериментально успешно решено<sup>5</sup>.

Поэтому главной целью создания установки — научиться получать электронный пучок с высокой реактивной мощностью, не стремясь при этом удовлетворить перечисленным выше условиям. Низкий («резинный») вакуум, малая длина эквипотенциального промежутка, магнитная система с полем умеренной напряженности (до 2 кГс) и участками неоднородного поля — все эти отступления от требований позволили резко упростить и удешевить установку. Схема установки показана на рис. 1.

Вакуумная камера имеет U-образную форму, ускорительные трубки расположены в ее вертикальных отрезках. Такое расположение позволяет избежать нежелательных механических напряжений в трубках и наиболее удобным образом оформить высоковольтную систему, включающую находящиеся под близкими потенциалами катод и коллектор.

Электроны из катода (1) приобретают в ускорительной трубке (2) полную энергию  $eU_0$ . В эквипотенциальном пространстве происходит поворот пучка на  $90^\circ$ , вывод его на горизонтальный участок и еще один поворот на  $90^\circ$ . Для компенсации центробежного дрейфа на участке поворота накладывается поперечное магнитное поле. Двигаясь затем вверх, электроны замедляются в трубке (3) и поступают на коллектор (4), имеющий положительный относительно катода по-

тенциал  $U_{\text{кол}} \ll U_0$ . Незахваченные коллектором вторичные электроны ускоряются до полной энергии и попадают в поворот. Для них направление центробежного

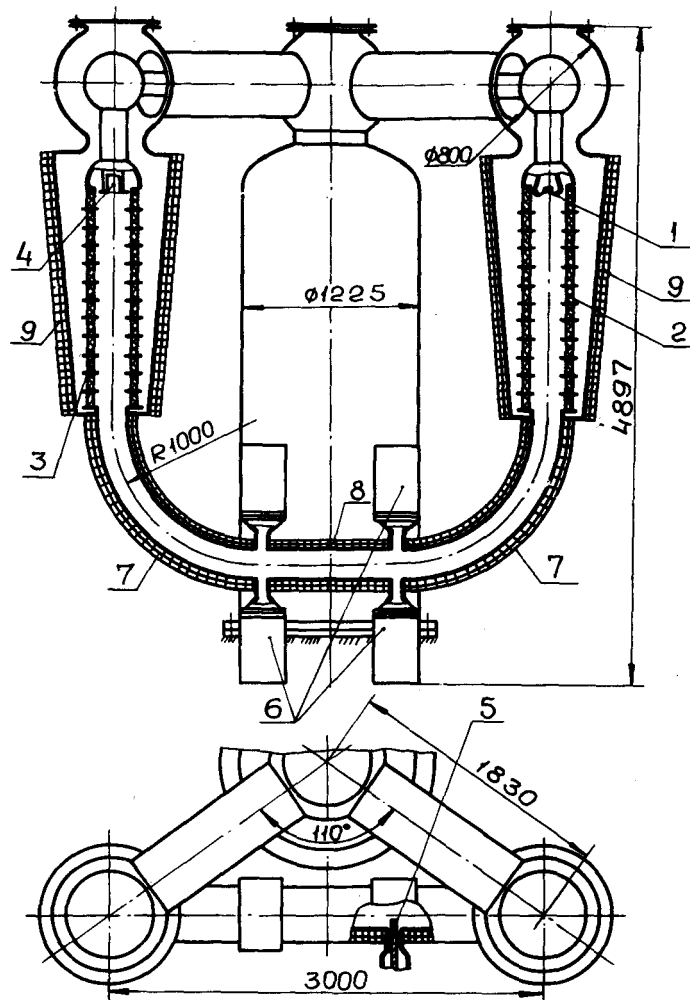


Рис. 1. Схема установки:

1 — катод, 2, 3 — ускорительные трубки; 4 — коллектор; 6 — магниторазрядные насосы; 7, 8, 9 — части соленоида: 7 — тороидальная, 8 — цилиндрическая, 9 — коническая.

дрейфа совпадает со смещением, вызванным поворотным полем, и, дрейфуя по горизонтали, эти электроны оседают либо на стенки вакуумной камеры, либо на специальный приемник (5).

Электрическая схема (рис. 2) собрана на основе элементов промышленного ускорителя электронов<sup>6</sup> ЭЛВ. Максимальное напряжение секционированного высоковольтного выпрямителя (1) 1 МВ, мощность 20 кВт. Общая нестабильность энергии 3%, пульсации при максимальной нагрузке  $\pm 0.5\%$ . Рекуперационный выпрямитель (2), включенный между катодом (3) и

коллектором (4), имеет максимальное напряжение 5 кВ и мощность 20 кВт, уровень пульсаций  $\pm 5\%$ . Распределение потенциала по электродам ускоряющей и тормозящей трубок задается омическими делителями (5, 6).

Энергия и коллекторное напряжение регулируются по первичной цепи, напряжение на первом аноде—переключателем магазина сопротивлений, включенного в цепь делителя трубки; переключение производится изолирующей штангой. Потенциал запирающего электрода (последнего перед коллектором электрода трубки и служащего для запираания потока вторичных частиц) регулируется аналогичным переключателем, но магазин сопротивлений включен параллельно рекуперационному выпрямителю. Ток пучка измеряется бесконтактным измерителем тока<sup>7</sup>, который охватывает фидер коллекторной трубки.

Камера выполнена из нержавеющей стали, уплотнения—резиновые, коллектор—из магнитной стали с меднением приемной поверхности. Откачка производится четырьмя магниторазрядными насосами (6) общей производительностью 1000 л/с. Рабочий вакуум около  $10^{-6}$  Торр.

Благодаря отсутствию сложных электронных схем, находящихся под высоким напряжением, и наличию системы защиты от перенапряжений установка может устойчиво работать при многократных пробоях. Специальная система защиты принципиально необходима в рекуперационных схемах, подобных описанной. В противном случае при пробоях могут возникать перенапряжения порядка полного напряжения  $U_0$ .

ное поле напряженностью до 2 кГс.

Питание соленоида на данном этапе производится от промышленного источника тока ИСТР, обеспечивающего напряженность магнитного поля до 1 кГс, пульсации поля порядка 1%. В ближайшее время, после отладки цепи обратной связи в источнике, будут достигнуты его проектные параметры—стабильность и пульсации менее  $10^{-4}$ .

По длине соленоида наложены витки поперечных полей, служащих для коррекции трех типов: поворотных, нацеливающих на коллектор, коррекции типа «тяги-толкая». Последние представляют собой обмотки, наложенные симметрично на пушечную и коллекторную конусные катушки и включенные встречно. С их помощью можно, не меняя положения пучка на входе в коллектор, выставить его на ось магнитного поля в области технологических разрывов на стыках частей соленоида. Это позволяет минимизировать углы, которые набирают электроны на возмущениях магнитного поля.

Работа на установке началась с промера магнитных полей и трассировки системы электронным пучком. Для этого на катод ( $\text{LaB}_6$ , диаметр 10 мм) накладывалась медная маска с пятью отверстиями диаметром 1 мм. Формируемые таким образом тонкие электронные пучки с энергией 7 кэВ наблюдались на стеклянной пластине, покрытой люминофором и расположенной на месте коллектора.

Зависимость размера области, занятой пучками (по измерениям изображения на люминофоре), от напряженности продольного магнитного поля имела резко

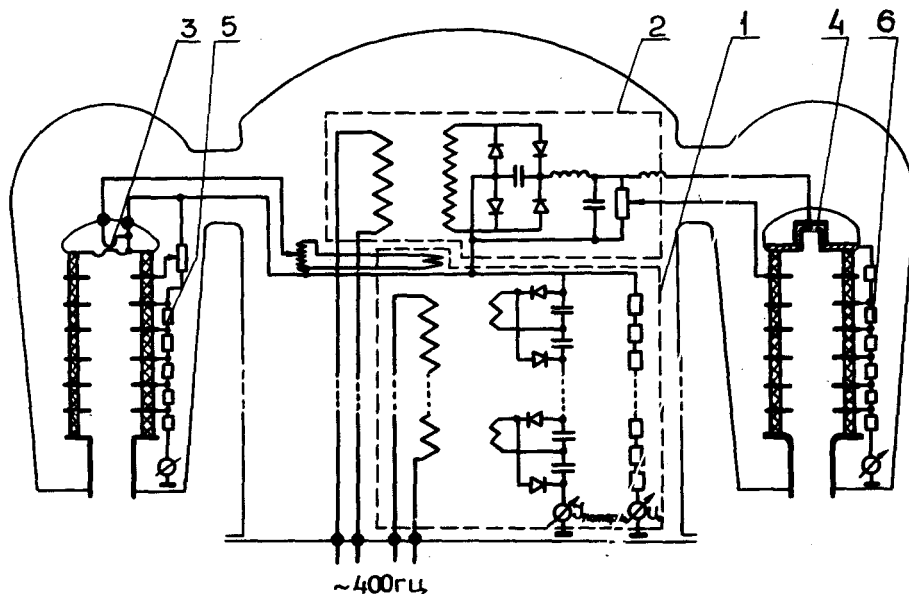


Рис. 2. Электрическая схема установки:  
1—секционированный высоковольтный выпрямитель; 2—рекуперационный выпрямитель; 3—катод; 4—коллектор; 5, 6—омические делители.

Все высоковольтные элементы находятся в общей газовой системе, позволяющей работать при давлении до 12 атм в среде  $\text{SF}_6$ .

Продольное магнитное поле создается соленоидом, состоящим (рис. 1) из двух одинаковых конических катушек (9), двух отрезков тороидальных катушек (7) и цилиндрического соленоида (8). Все части соленоида намотаны в один слой шиной  $26 \times 26$  мм с каналом ( $\varnothing 10$  мм) для охлаждающей воды в центре. Шаг обмотки 32 мм. Соленоид позволяет получить магнит-

немонотонный характер. Этот размер уменьшается до 10 мм только при выделенных значениях циклотронной длины  $\lambda = 2\pi \frac{\sqrt{2eU_0/m}}{eH_0/mc}$  и при больших напряженностях поля  $H_0$ , когда  $\lambda < 1.5$  см. Такое поведение связано с наличием четырех технологических разрывов в соленоиде, в каждом из которых электроны меняют поперечные скорости. В зависимости от фазы эти «удары» могут либо взаимно компенсировать друг друга, либо скла-

дываться. Так, наблюдаются минимумы размера для значений  $H_0$ , отличающихся на величину  $\Delta H = 4pc/eR$ , где  $R$ —радиус кривизны поворота,  $p$ —импульс электрона. Эти значения соответствуют взаимной компенсации возмущений на краях поворота.

В ходе трассировки были также измерены необходимые величины токов коррекции и отлажены источники питания.

На следующем этапе была начата работа с пучком в режиме рекуперации энергии без наддува изолирующего газа. Схемы ускоряющего и замедляющего участков электронно-оптического тракта представлены на рис. 3. Электронная пушка—диодная, с первеансом  $1 \text{ мкА/В}^{3/2}$ . Катод из  $\text{LaB}_6$  имеет диаметр 10 мм, мощность накала около 50 Вт. Напряжение по ускоряющим трубкам разнесено равномерно, длина трубок на этом этапе 30 см (1 секция трубки ускорителя ЭЛВ).

Коллектор выполнен из магнитной стали. Охлаждение его осуществляется с помощью вскипающего фреона-12, поступающего по полиэтиленовым трубам, навитым на ускоряющую трубку. Максимальная снимаемая мощность около 8 кВт.

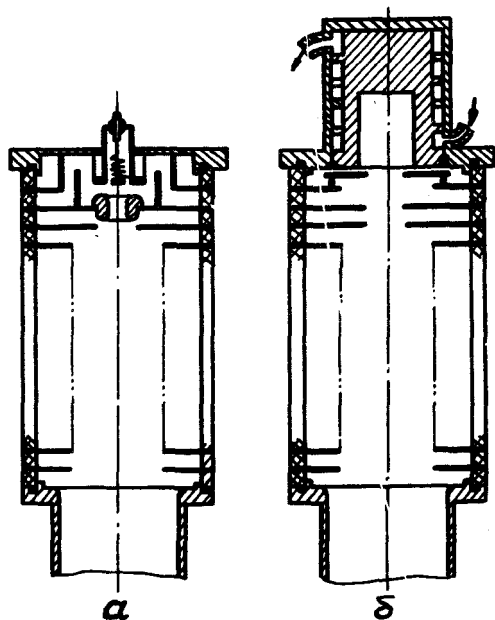


Рис. 3. Схемы ускоряющего (а) и замедляющего (б) участков электронно-оптического тракта.

Измерения показали, что работа с малым токооседанием на электродах с высоким потенциалом возможна (при фиксированной энергии) только при определенных значениях магнитного поля, либо при достаточно большой его напряженности. Соответствующие значения циклотронных длин совпадают с данными трассировки.

К настоящему времени на установке осуществлена устойчивая проводка пучка с током 1 А при полной энергии 100 кэВ и ведущем поле 200 Гс. Потенциал коллектора при этом 3 кВ, относительные потери тока  $2 \cdot 10^{-3}$ . Максимальная величина тока ограничена эмиссионной способностью катода.

Следующим этапом работы планируется наддув изолирующего газа и увеличение напряжения.

## Литература

1. Будкер Г.И., Скринский А.Н. УФН, 1978, т.124, вып.4, с.561.
2. Скринский А.Н., Пархомчук В.В. ЭЧАЯ, 1981, т.12, вып.3, с.557.
3. Куделайнен В.И., Мешков И.Н., Салимов Р.А. Препринт ИЯФ 72-70. Новосибирск, 1970; CERN 77-08. Geneva, 1977.
4. Всеволожская Т.А., Гришанов Б.И. и др. Труды VII Всесоюз. совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980, т.1, с.229; Препринт ИЯФ 80-182. Новосибирск, 1980.
5. Poth H. Proc. of the Workshop on Electron Cooling and Related Applications. Karlsruhe, 1984, p.45.
6. Будкер Г.И., Гапонов В.А. и др. Атомная энергия, 1976, т.40, вып.3, с.216.
7. Баклаков Б.А., Веремеенко В.Ф., Карлинер М.М., Литвинов А.А., Петров С.П. ПТЭ, 1979, № 3, с.39.

## Discussion

I. Boscolo. Have you used the continuous mode only?

Р.А. Салимов. Да, только непрерывный режим. Максимальное непрерывное время работы установки составляло порядка 1 час. Она ограничена стабильностью магнитного поля, так как изменение магнитного поля приводит к изменению положения пучка в коллекторе и резкому увеличению тока потерь. В настоящее время стабильность магнитного поля составляет  $\approx 1\%$  и легко может быть увеличена до  $0.01\%$ . Вдоль длины установки величина магнитного поля изменяется достаточно сильно ( $\Delta B/B \approx 0.3$ ). Это, конечно, увеличивает углы в пучке, но наша задача состояла совсем в другом—транспортировка пучка с большим током и на высокой энергии от электронной пушки до коллектора, а для этого не требуется магнитное поле высокого качества.

I. Boscolo. Have you used corrections of magnetic field?

Р.А. Салимов. Нет, не использовали. Мы считаем, что это слишком дорого для нашей установки. Я хочу еще раз подчеркнуть, что основной задачей было не получение качества пучка, а получение большого тока электронного пучка на высокой энергии.

E. Fisk. What long-term stability and voltage pulsation have you obtained?

Р.А. Салимов. Долговременная стабильность порядка  $1\%$ . Пульсации составляли  $0,5\%$  на частоте 800 Гц, при этом потери тока из коллектора составляли порядка нескольких миллиампер.