

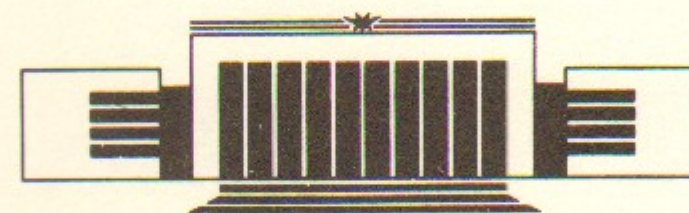
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР



В.И. Гусельников, И.Н. Мешков, Т.И. Оришич,  
В.Я. Савкин, В.П. Фунтиков

**РЕКУПЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ  
ИНТЕНСИВНОГО ПУЧКА ПРОТОНОВ,  
КОМПЕНСИРОВАННОГО  
МЕДЛЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ**

ПРЕПРИНТ 88-122



НОВОСИБИРСК

Рекуперация энергии  
интенсивного пучка протонов,  
компенсированного медленными электронами

В.И. Гусельников, И.Н. Мешков, Т.И. Оришич,  
В.Я. Савкин, В.П. Фунтиков

Институт ядерной физики  
630090, Новосибирск 90, СССР

АННОТАЦИЯ

Описываются экспериментальные исследования прямого преобразования (рекуперации) энергии интенсивного ионного пучка. В рекуператоре низкоэнергичные электроны пучка отделяются сеточным блоком, а ионы принимаются на один из трех видов коллекторов: плоский, «цилиндр Фарадея» с сеткой на входном отверстии и без нее. Преобразование энергии пучка протонов с плотностью тока до  $150 \text{ мА/см}^2$  при длительности импульса тока  $300 \text{ мкс}$  и мощностью около  $0.5 \text{ кВт}$  производится с эффективностью  $70\%$ , при мощности до  $30 \text{ кВт}$  — с эффективностью около  $50\%$ .

Результаты исследований могут быть использованы при разработке систем рекуперации в термоядерных установках.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . .	5
Краткий обзор предшествующих исследований . . . . .	6
Описание установки . . . . .	8
Рекуператор. Сеточный блок . . . . .	12
КПД рекуператора . . . . .	16
Рекуператор с плоским коллектором . . . . .	18
Рекуператор с коллектором «цилиндр Фарадея» . . . . .	20
Баланс токов . . . . .	23
Заключение . . . . .	28
Литература . . . . .	30

## ВВЕДЕНИЕ

В термоядерных установках возникает задача рекуперации энергии заряженных частиц плазменного потока. Ее решение позволит существенно повысить КПД термоядерного реактора. При этом задача распадается на две части. Первая, относительно более простая, рекуперация энергии ионов в плазменном потоке, инжектируемом в реактор для нагрева плазмы: в этом случае разброс энергии ионов, как правило, мал. Вторая — рекуперация энергии частиц потока плазмы, покидающего реактор. В таком потоке температура частиц соизмерима с энергией направленного движения, что существенно усложняет задачу.

Известно несколько схем плазменных рекуператоров, предложенных и частично исследованных экспериментально [1—7]. Их существенное отличие от рекуператоров энергии электронных пучков, техника которых высоко развита (см. [8, 9] и библиографию там же), состоит в необходимости разделения компонент потока плазмы и сепарации по энергии. Правда, задача эффективной рекуперации энергии ионной компоненты облегчается тем, что приемная поверхность находится под положительным потенциалом, и тем самым вторичная ион-электронная эмиссия автоматически подавлена, а вторичная ион-ионная эмиссия, как правило, мала. В электронных рекуператорах как раз вторичная электронная эмиссия дает основной вклад в потери тока, захватываемого коллектором.

В данной работе описаны экспериментальные исследования рекуперации энергии ионов в пучке, генерируемом протонным инжектором типа «Старт» [10] с плотностью тока  $10-100 \text{ мА/см}^2$ . Пучок в дрейфовой камере компенсируется низкоэнергичными (ионизационными) электронами, так что в рекуператор поступает

поток плазмы, в котором разброс энергии ионов много меньше их средней кинетической энергии.

Разделение компонент плазмы в рекуператоре принципиально необходимо и в этом случае, иначе суммарный ток на коллектор близок к нулю.

В отличие от ранее опубликованных работ [1—7], где эксперименты проводились с ионными пучками низкой интенсивности, в нашем случае отношение характерного размера пучка к дебаевскому радиусу равно 1—10, таким образом, эффекты пространственного заряда имели определяющее значение.

### 1. КРАТКИЙ ОБЗОР ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Идея прямого преобразования (рекуперации) энергии заряженных частиц, покидающих термоядерный реактор, была предложена Р. Постом [1] в 1969 г. Рекуператор Поста, представляющий систему электродов с периодически меняющимся электрическим полем, был исследован экспериментально [2]; для узких моноэнергетических пучков низкой интенсивности он показал эффективность преобразования энергии 86%.

В работе [3] для рекуперации узких слаборасходящихся ионных пучков ( $\alpha \sim 0,1$  рад;  $\epsilon = \frac{v_1^2}{v^2} \sin^2 \alpha \simeq 0,01$ ) был предложен рекуператор с системой скошенных диафрагм. Экспериментальная проверка для пучка ионов  $N^+$  (диаметр пучка 3 мм, энергия ионов 1—4 кэВ и ток 2 мкА) показала эффективность системы порядка 96%. Для преобразования энергии более интенсивных ионных пучков была предложена система со скрещенными  $\vec{E} \times \vec{H}$ -полями с применением компенсации объемного заряда ионов электронным потоком [4]. Экспериментально система исследовалась для низкоинтенсивных ионных пучков с энергией 3 кэВ, током около 1—2 мкА, для которых влияние сил пространственного заряда мало.

Для рекуперации энергии интенсивных ионных пучков в работе [6] была предложена система с двумя супрессорами для отражения электронов, сопровождающих пучок, и жалюзной системой коллекторов (рис. 1). Эксперименты на протонных и гелиевых ионных пучках с энергией до 100 кэВ, током до 1,4 А дали эффективность преобразования до 68%.

Для преобразования энергии частиц плазменных потоков была предложена [7] односекционная система с двумя сетками (зазем-

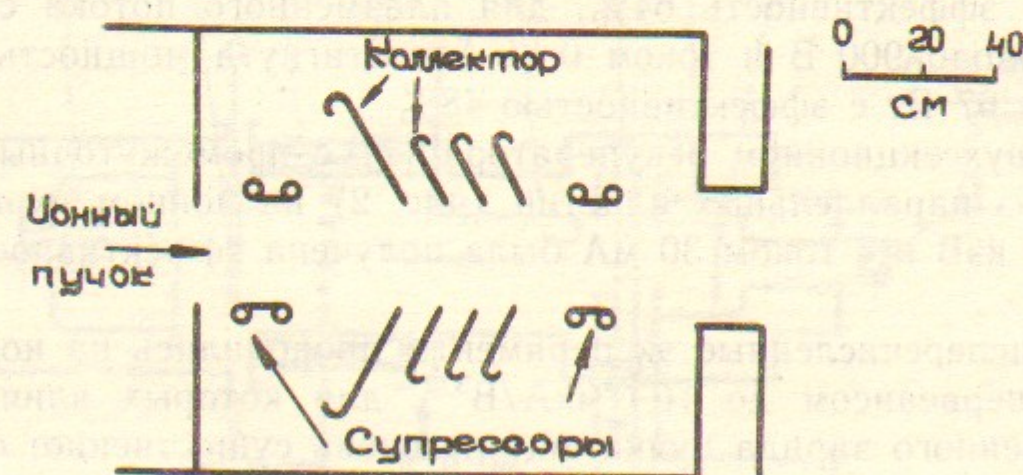


Рис. 1. Рекуператор с жалюзной системой коллекторов.

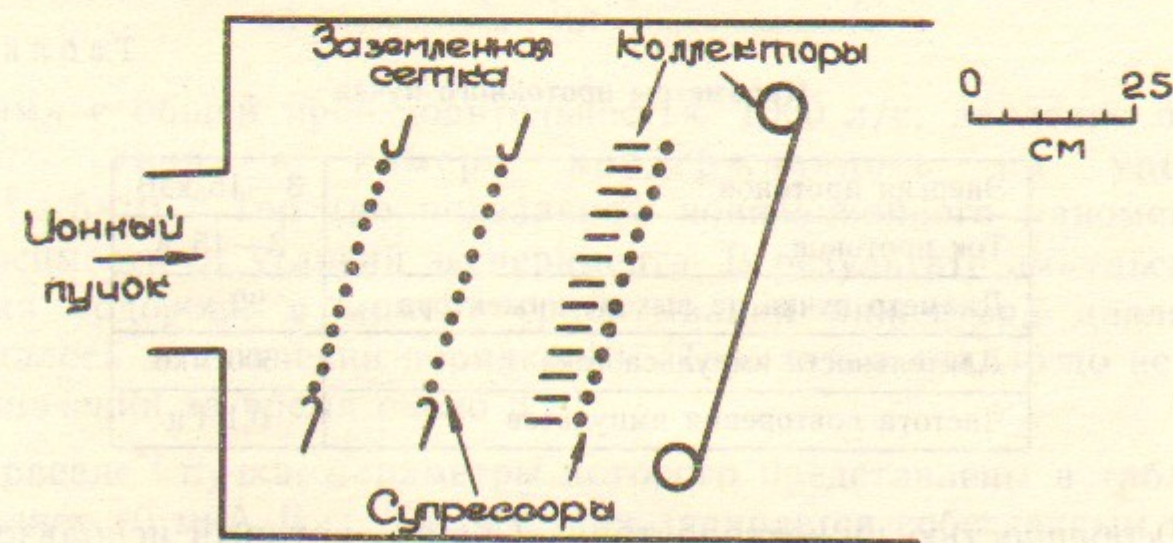


Рис. 2. Двухсекционный рекуператор с промежуточным коллектором из параллельных пластин:  $I = 30$  мА,  $U_0 = 80$  кВ.

ленной и супрессорной) и плоским коллектором. В экспериментах с ионным пучком с энергией 100 кэВ, током до 60 мА была достигнута эффективность 64%, для плазменного потока с энергией ионов около 900 В и током 0,14 А достигнута мощность преобразования 67 Вт с эффективностью 48%.

В двухсекционном рекуператоре [7] с промежуточным коллектором из параллельных пластин (рис. 2) на ионном пучке с энергией 80 кэВ и с током 30 мА была получена эффективность порядка 60%.

Вышеперечисленные эксперименты проводились на ионных пучках с первеансом до  $10^{-3}$  мкА/В<sup>3/2</sup>, для которых влияние пространственного заряда пучка еще не очень существенно: отношение характерного поперечного размера пучка к дебаевскому радиусу  $0,01 \div 0,1$ .

## 2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка (рис. 3) состоит из протонного инжектора, дрейфовой камеры длиной 1 м и рекуператора. Параметры протонного пучка, инжестируемого в камеру, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры протонного пучка

Энергия протонов	3—15 кэВ
Ток протонов	3—15 А
Диаметр пучка на выходе инжектора	90 мм
Длительность импульса тока	300 мкс
Частота повторения импульсов	0,1 Гц

Особенностью инжектора типа «Старт», который использовался в работе, является жесткая зависимость («закон 3/2») тока пучка от ускоряющего напряжения (энергии протонов). Поэтому для уменьшения тока пучка в некоторых экспериментах применялись вырезающие диафрагмы. Полный ток пучка контролировался токовым трансформатором (пояс Роговского) в цепи питания инжектора.

Цилиндрическая дрейфовая камера диаметром не менее 150 мм и объемом около 50 л откачивалась тремя магниторазрядными

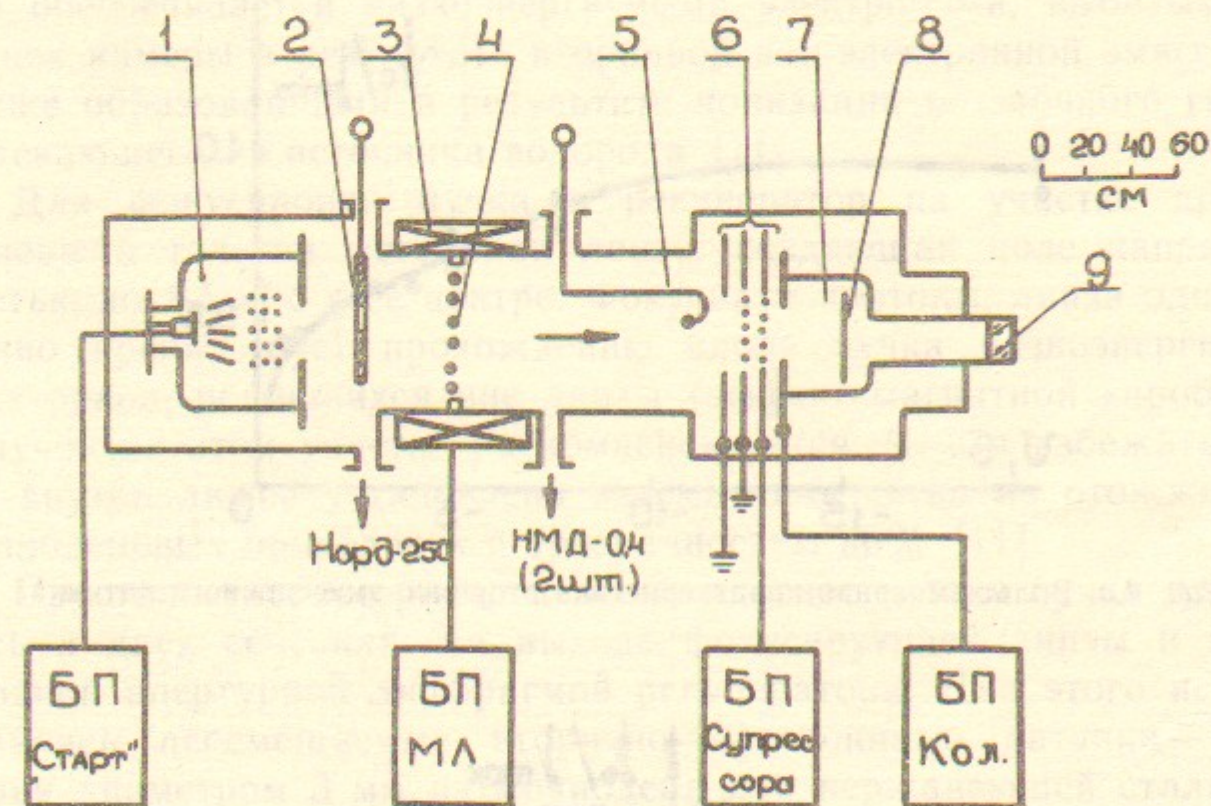


Рис. 3. Экспериментальная установка:

1 — источник пучка протонов «Старт»; 2 — вырезающая диафрагма; 3 — магнитная линза; 4 — сетка для компенсации пространственного заряда пучка; 5 — вторично-эмиссионный датчик; 6 — сеточный блок рекуператора; 7 — коллектор рекуператора; 8 — фольга; 9 — смотровое окно; БП — блок питания; МЛ — магнитная линза.

насосами с общей производительностью 1000 л/с; давление остаточного газа в камере поддерживалось на уровне  $5 \cdot 10^{-5} \div 5 \cdot 10^{-6}$  Тор (по показаниям ионизационного манометра) в зависимости от условий эксперимента. В результате импульсного напуска водорода в момент срабатывания инжектора давление повышалось до значения порядка  $10^{-4}$  Тор, затем падало до исходного значения за время около 3 с.

Первеанс<sup>\*)</sup> пучка, параметры которого представлены в табл. 1, составляет  $10$  мкА/В<sup>3/2</sup>. Такой пучок запирается собственным пространственным зарядом на расстоянии порядка 1 см от ионного источника и попадает на стенки камеры. Распространяться вдоль камеры на большие расстояния ионный пучок такой интенсивности может только при условии компенсации его пространственного заряда,

<sup>\*)</sup> Иногда вместо первеанса (с током  $I$  и кинетической энергией частиц  $eU_0$ ) используют параметр, равный отношению поперечного сечения пучка  $a$  к дебаевскому радиусу ионов  $R_D$ :  $\frac{a}{R_D} = \left(\frac{8m}{e}\right)^{1/4} P^{1/2}$ .

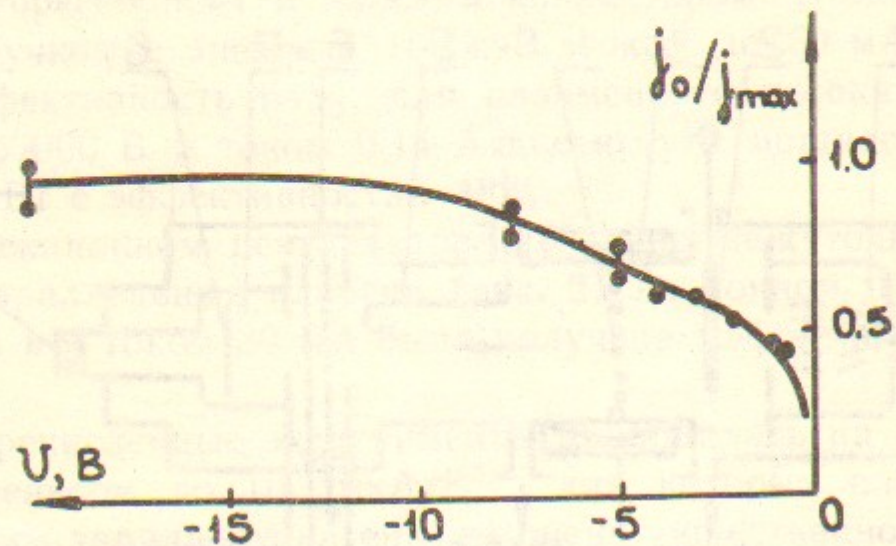


Рис. 4,а. Вольт-амперная характеристика вторично-эмиссионного датчика.

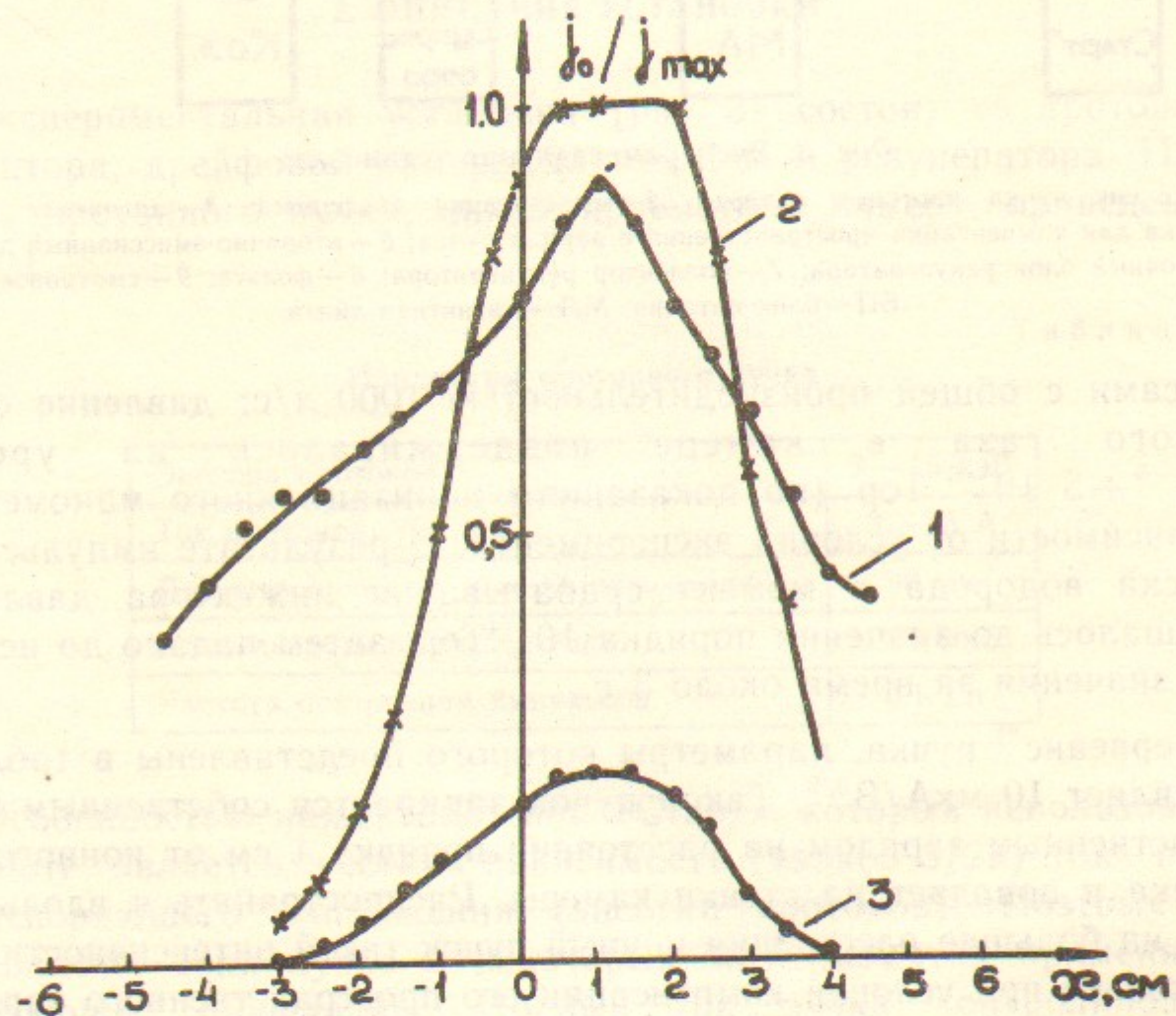


Рис. 4,б. Распределение плотности тока пучка на входе в рекуператор:  
1 — нефокусированный пучок; 2 — сфокусированный пучок; 3 — пучок диафрагмирован отверстием  $\varnothing 20$  мм.

что обеспечивается низкоэнергичными электронами, выбитыми со стенок камеры в результате вторичной ион-электронной эмиссии, а также образованными в результате ионизации остаточного газа и вытекающего из источника водорода [11].

Для фокусировки пучка в рекуператор на участке дрейфа помещена толстая магнитная линза, создающая поле напряженностью до 1,5 кГс в ее центре. Фокусируя протоны, линза одновременно препятствует прохождению вдоль пучка низкоэнергичных электронов, родившихся вне линзы (эффект магнитной «пробки»), и пучок на этом участке раскомпенсируется. Чтобы избежать этого, внутри линзы установлена заземленная сетка из отожженных молибденовых проволочек с прозрачностью 96% [11].

Пространственное распределение плотности тока пучка измерялось в двух сечениях: на выходе фокусирующей линзы и перед входной апертурной диафрагмой рекуператора. Для этого использовались перемещаемые вторично-эмиссионные датчики — пластинки диаметром 3 мм из молибдена или нержавеющей стали. На них подавался потенциал около  $-40$  В для отражения низкоэнергичных электронов, сопровождающих ионный пучок.

Вольт-амперная характеристика датчика (рис. 4,а) показывает, что потенциал  $-20$  В является достаточным для отражения электронов.

Размеры пучка, а также полный ток, как отмечено выше, можно было ограничивать с помощью вырезающих диафрагм, вводимых на выходе инжектора (диаметры 10—50 мм). На рис. 4,б

приведены типичные кривые распределения плотности тока для нефокусированного пучка (кривая 1) и пучка, сфокусированного в отверстие апертурной диафрагмы (кривая 2). При сфокусированном пучке на диафрагме все же имеется положительный ток, происхождение которого можно объяснить вторично-эмиссионным током от нейтралов, возникших в результате перезарядки протонов в облачке вытекающего из источника водорода, а также наличием в пучке низкоэнергичных положительных ионов. Диафрагмирование (кривая 3) позволяет снизить ток на апертурную диафрагму рекуператора. Последнее необходимо для проведения рекуперационных

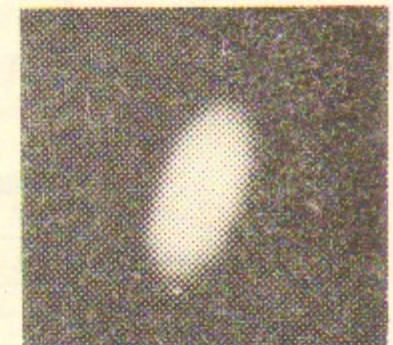


Рис. 5. Фотография следа пучка, сфокусированного на титановую фольгу толщиной 10 мкм. Энергия протонов  $eU_0 = 15$  кэВ, длительность импульса  $\tau_n \approx 0,5$  мс.

экспериментов в чистых условиях. Положение пучка в рекуператоре регистрировалось по свечению тонкой (10 мкм) титановой фольги (рис. 5), нагреваемой пучком.

### 3. РЕКУПЕРАТОР. СЕТОЧНЫЙ БЛОК

В выбранной схеме рекуператора отделение низкоэнергичных электронов проводилось с помощью сеточного блока, а ионы принимались на один из трех видов коллекторов: плоский, «цилиндр Фарадея» или «цилиндр Фарадея» с сеткой. Токи со всех электродов рекуператора измерялись токовыми трансформаторами, откалиброванными с точностью не хуже  $\pm 5\%$ . Питание коллектора и супрессорной сетки осуществлялось от конденсаторной батареи, заряжаемой до требуемого потенциала. Подсадка напряжения на конденсаторной батарее за время импульса не превышала 1%. Сеточный блок (рис. 6) состоял из апертурной диафрагмы AD,

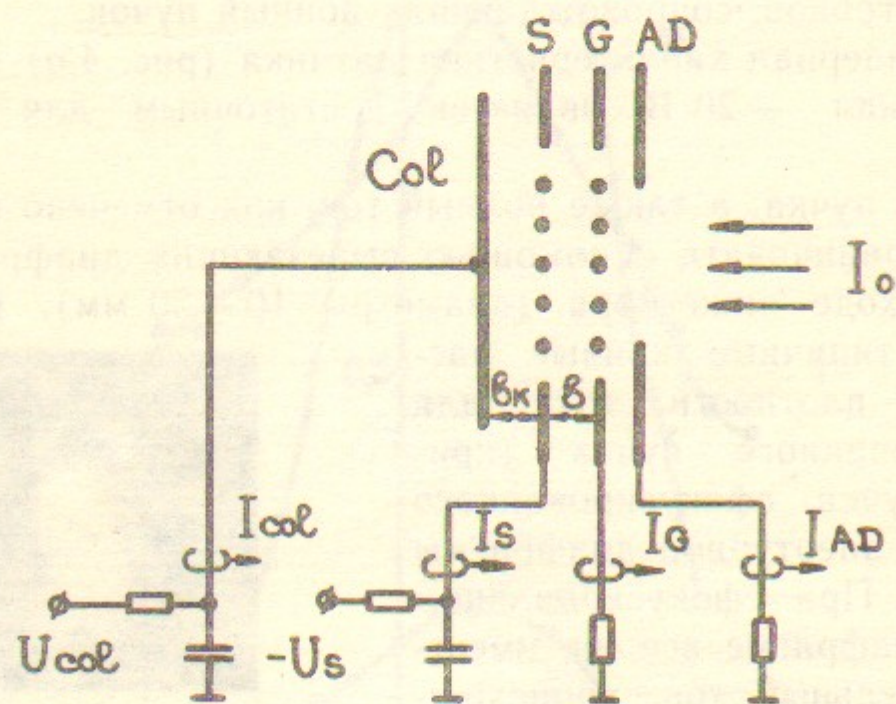


Рис. 6. Схема рекуператора с плоским коллектором и цепи питания электродов.  $\circ \rightarrow$  — токовый трансформатор.

первой сетки G под потенциалом земли и супрессорной сетки S под отрицательным потенциалом  $U_s$ . Заземленная сетка G исключает влияние электрического поля внутри рекуператора на пучок в дрейфовой камере. Супрессорная сетка S служит для отражения низкоэнергичных электронов, компенсирующих пространственный

заряд пучка. Диаметр отверстия диафрагмы AD выбирался меньше диаметра держателей сеток для предотвращения попадания на них частиц пучка. Сетки изготовлены из молибденовой проволоки диаметром 0,2 мм, отожженной в вакууме с целью уменьшения с нее вторичной ион-электронной эмиссии. Эксперименты проводились с двумя вариантами сеточного блока, которые отличались геометрическими размерами (табл. 2).

Таблица 2  
Геометрические размеры сеточных блоков

Наименование блока	Шаг $h$ сеток G и S, мм	Диаметр сетки G, мм	Диаметр сетки S, мм	Расстояние $b$ между сетками S и G, мм	Диаметр отверстия диафрагмы AD, мм
Сеточный блок 1	6	50	60	5	50
Сеточный блок 2	2	100	100	8	60; 80

Отрицательный потенциал супрессорной сетки подбирался экспериментально и зависел от геометрии рекуператора и потенциала коллектора. Провисание потенциала  $\Delta\phi$  (разность потенциалов между центром ячейки и проволокой сетки) по порядку величины составляет

$$\Delta\phi \sim \left( \frac{U_{col} - U_s}{b_k} - \frac{U_s}{b} \right) h, \quad (1)$$

где  $U_s$ ,  $U_{col}$  — потенциалы супрессора и коллектора;  $b$ ,  $b_k$  — расстояния от супрессора до сетки G и коллектора, соответственно;  $h$  — шаг сетки. Электроны с температурой  $T_e$  отражаются супрессором, если

$$U_s < U_{s\text{ крит}} \sim - \frac{\frac{T_e}{e} + U_{col} \frac{h}{b_k}}{1 + \frac{h(b_k - b)}{b \cdot b_k}}. \quad (2)$$

Для типичных значений экспериментальных параметров:  $\frac{T_e}{e} \ll U_{col} \frac{h}{b_k}$  и  $b \sim b_k$ , так что формула (2) может быть упрощена:

$$U_{s\text{ крит}} \sim - U_{col} \frac{h}{b_k}. \quad (3)$$

Эта формула работает при  $h \ll b_k$ .

На рис. 7 приведены типичные зависимости тока коллектора от напряжения на супрессорной сетке. Экспериментальные значения  $U_{s\text{ крит}}$  и рассчитанные по формуле (3) даны в табл. 3. Видно, что экспериментальные данные качественно подтверждают зависимость (3): величина  $U_{s\text{ крит}}$  увеличивается при увеличении  $U_{col}$  и уменьшается при уменьшении отношения  $h/b_k$ . В экспериментах наблюдался значительный положительный ток на супрессорную сетку. Для сеточного блока 1 с прозрачностью 97% он составляет  $I_s/I_{col} \sim 20 \div 30\%$ , а для сеточного блока 2 с прозрачностью 90%  $I_s/I_{col} \sim 60 \div 80\%$ .

Таблица 3

Критические напряжения супрессора

Параметры		Сеточный блок 1		Сеточный блок 2		
$U_{col}$ , кВ		1	3	1	5	8
$U_{s\text{ крит}}$ , кВ	экспер.	1,2	2	0,8	1,1	1,4
	теорет.	1,2	3,6	0,25	1,25	2

С учетом коэффициентов вторичной ион-электронной эмиссии  $\gamma$  с поверхности молибденовых проволочек и геометрической прозрачности

$$\frac{I_s}{I_{col}} = \frac{\chi(1+\gamma)}{1-\chi(1+\gamma)}, \quad (4)$$

где  $\chi = d/h$  — непрозрачность сетки ( $d$  — диаметр проволочек). Для молибдена, отожженного в вакууме, по данным [12]  $\gamma \approx 1$ . Тогда оценки по формуле (4) дают следующие значения:

$I_s/I_{col} \approx 6,5\%$  для сеточного блока 1;

$I_s/I_{col} \approx 25\%$  для сеточного блока 2.

Таким образом, экспериментальное значение тока на супрессорную сетку примерно втрое больше расчетного. Наличие в пучке 30% нейтралов дает небольшую поправку к расчетной величине  $I_s/I_{col}$ .

Для определения доли ионного тока, попадающего со стороны коллектора на супрессор, была помещена диагностическая диафрагма  $DD$  (рис. 8) на расстоянии порядка 1 мм от супрессора. Эта

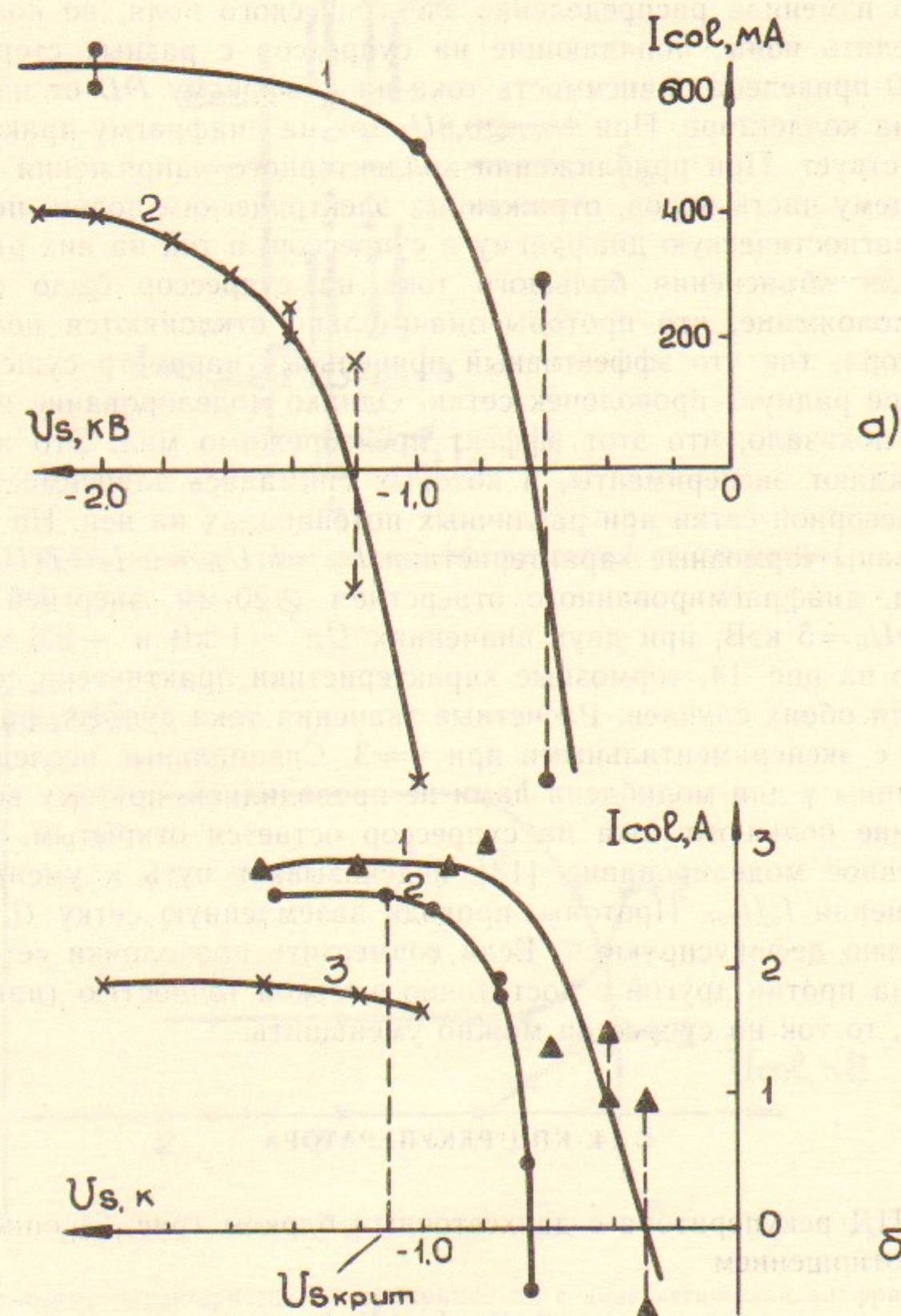


Рис. 7. Зависимость тока коллектора  $I_{col}$  от напряжения на супрессорной сетке  $U_s$ : а) — сеточный блок 1,  $U_0 = 5$  кВ: 1 —  $U_{col} = 1$  кВ; 2 —  $U_{col} = 3$  кВ; б) — сеточный блок 2,  $U_0 = 10$  кВ: 1 —  $U_{col} = 1$  кВ; 2 —  $U_{col} = 5$  кВ; 3 —  $U_{col} = 8$  кВ.



диафрагма, находящаяся под потенциалом супрессора, несущественно изменяла распределение электрического поля, но позволяла разделить ионы, попадающие на супрессор с разных сторон. На рис. 9 приведена зависимость тока на диафрагму  $DD$  от напряжения на коллекторе. При  $U_{col} \leq 0,8U_0$  ток на диафрагму практически отсутствует. При приближении коллекторного напряжения к ускоряющему часть ионов, отраженных электрическим полем, попадает на диагностическую диафрагму и супрессор, и ток на них растет.

Для объяснения большого тока на супрессор было сделано предположение, что протоны значительно отклоняются полем супрессора, так что эффективный прицельный параметр существенно больше радиуса проволочек сетки. Однако моделирование на ЭВМ [13] показало, что этот эффект пренебрежимо мал. Это же подтверждают эксперименты, в которых снималась зависимость тока супрессорной сетки при различных потенциалах на ней. На рис. 14 показаны тормозные характеристики  $I_{col} = f(U_{col})$  и  $I_s = f(U_{col})$  для пучка, диафрагмированного отверстием  $\varnothing 20$  мм, энергией протонов  $eU_0 = 5$  кВ, при двух значениях  $U_s$ :  $-1$  кВ и  $-5,6$  кВ. Как видно на рис. 14, тормозные характеристики практически совпадают для обоих случаев. Расчетные значения тока супрессора совпадают с экспериментальными при  $\gamma = 3$ . Специальные исследования величины  $\gamma$  для молибдена нами не проводились, поэтому вопрос о причине большого тока на супрессор остается открытым. Однако численное моделирование [13] подсказывает путь к уменьшению отношения  $I_s/I_{col}$ . Протоны, проходя заземленную сетку  $G$ , незначительно дефокусируются. Если совместить проволочки сеток  $G$  и  $S$  одна против другой с достаточно высокой точностью (например,  $0,1d$ ), то ток на супрессор можно уменьшить.

#### 4. КПД РЕКУПЕРАТОРА

КПД рекуператора с двухсеточным блоком (рис. 6) описывается соотношением

$$\eta = \frac{U_{col} \cdot I_{col} - U_s \cdot I_s}{U_0 \cdot I_0}, \quad (5)$$

где  $I_{col}$ ,  $I_s$  — токи на коллектор и супрессор;  $U_{col}$ ,  $U_s$  — потенциалы коллектора и супрессора;  $U_0$ ,  $I_0$  — ускоряющее напряжение источника ионов и ток ионов на входе рекуператора. Значение  $I_0$  в этом

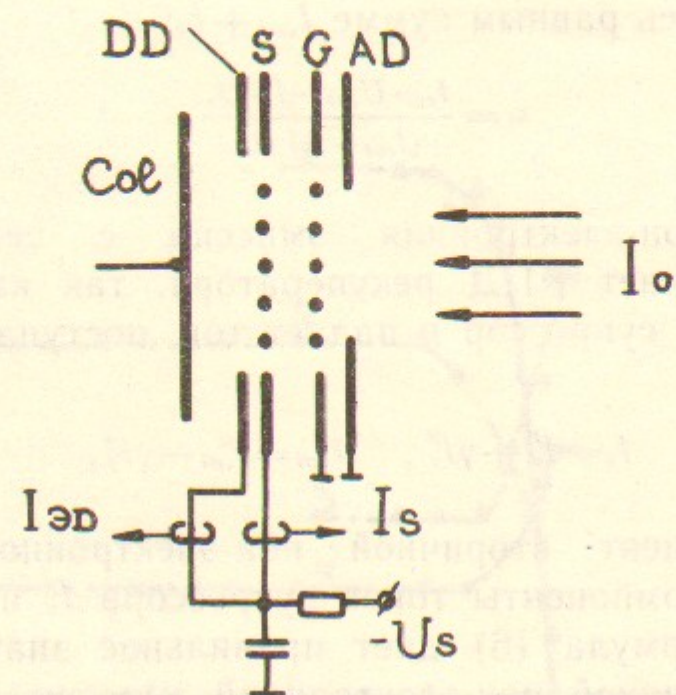


Рис. 8. Рекуператор с диагностической диафрагмой на супрессоре.

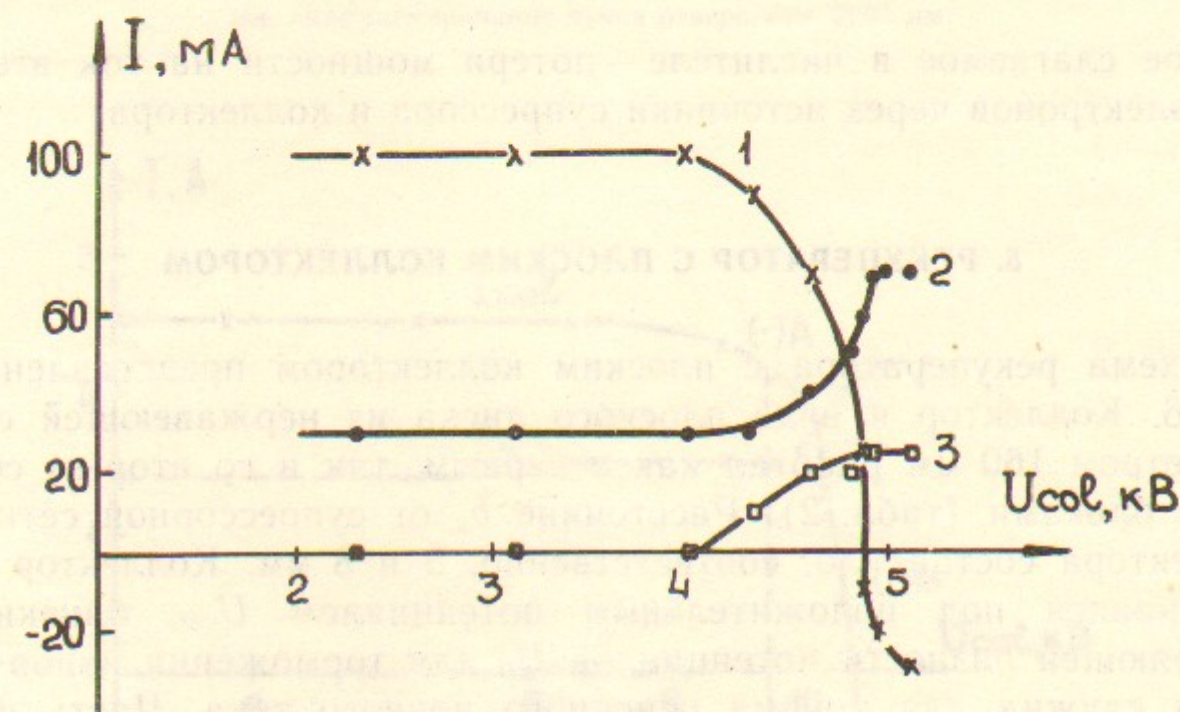


Рис. 9. Тормозные характеристики к экспериментам с диагностической диафрагмой ( $U_0 \approx 5$  кВ,  $U_s \approx -3$  кВ):

1 — ток коллектора  $I_{col}$ , 2 — ток супрессора  $I_s$ , 3 — ток на диагностическую диафрагму  $I_{DD}$ .

случае принималось равным сумме  $I_{col} + I_s$ :

$$\eta = \frac{I_{col} \cdot U_{col} - I_s \cdot U_s}{(I_{col} + I_s) U_0} \quad (6)$$

Вторичная ион-электронная эмиссия с сетки супрессора существенно снижает КПД рекуператора, так как в результате возрастает ток на супрессор и падает ток, поступающий в коллектор:

$$I_s = I_s^p + \gamma I_s^p, \quad I_{col} = I_{col}^p - \gamma I_s^p, \quad (7)$$

где  $\gamma$  — коэффициент вторичной ион-электронной эмиссии;  $I_s^p$ ,  $I_{col}^p$  — протонные компоненты токов супрессора  $I_s$  и коллектора  $I_{col}$ . Отметим, что формула (6) дает правильное значение КПД и в присутствии вторичной ион-электронной эмиссии, если в качестве  $I_s$ ,  $I_{col}$  в ней брать полные токи (7). Тогда

$$\eta = \frac{I_{col} U_{col} - (U_{col} + U_s) \gamma I_s^p - I_s^p U_s}{(I_{col}^p + I_s^p) U_0} \quad (8)$$

Второе слагаемое в числителе — потери мощности на ток вторичных электронов через источники супрессора и коллектора.

### 5. РЕКУПЕРАТОР С ПЛОСКИМ КОЛЛЕКТОРОМ

Схема рекуператора с плоским коллектором представлена на рис. 6. Коллектор в виде плоского диска из нержавеющей стали диаметром 160 мм работал как с первым, так и со вторым сеточными блоками (табл. 2). Расстояние  $b_k$  от супрессорной сетки до коллектора составляло, соответственно, 5 и 8 мм. Коллектор поддерживался под положительным потенциалом  $U_{col}$ , близким к ускоряющей разности потенциалов  $U_0$  для торможения ионов пучка, и служил для приема основного ионного тока. Часть ионов попадала на супрессорную сетку, выбивая с нее вторично-эмиссионные электроны. Возникающий при этом положительный ток  $I_s$  в цепи супрессорной сетки составлял основную долю токовых потерь в рекуператоре.

Типичные тормозные характеристики  $I_{col} = f(U_{col})$  и  $I_s = f(U_{col})$  для плоского коллектора показаны на рис. 10 и 11. На рис. 10 отмечена точка А, для которой произведение коллекторного тока

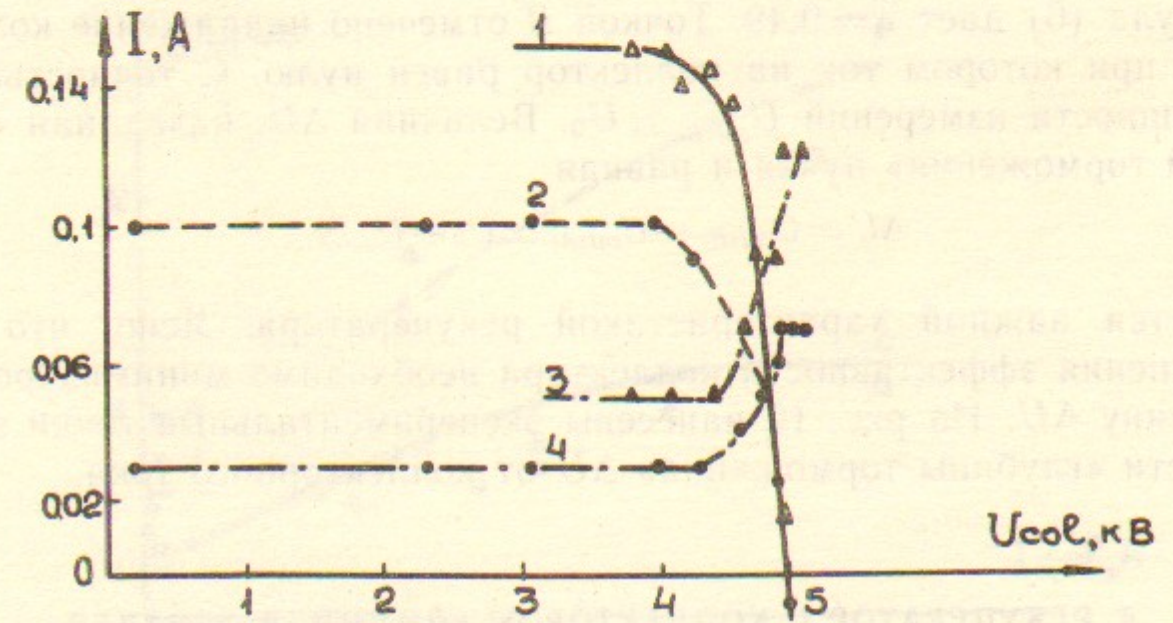


Рис. 10. Тормозные характеристики рекуператора с плоским коллектором с сеточным блоком 1 ( $U_0 \approx 5$  кВ):

1, 2 — токи коллектора и супрессора, диафрагмирование пучка отверстием  $\varnothing 20$  мм; 3, 4 — то же, диафрагмирование пучка отверстием  $\varnothing 40$  мм.

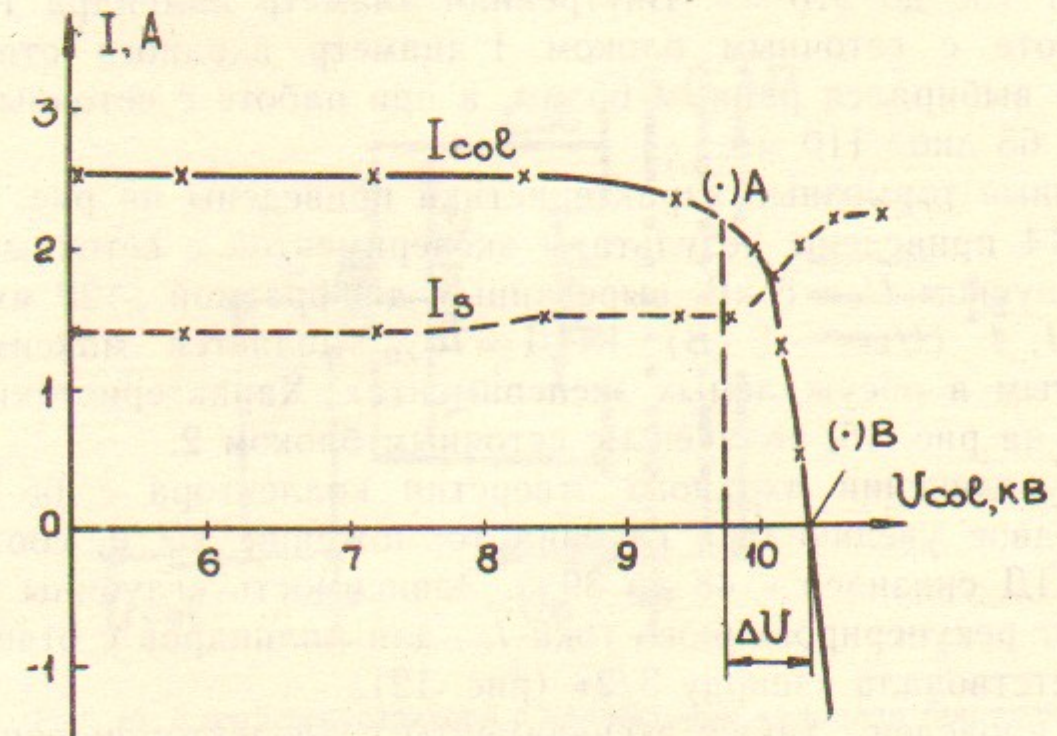


Рис. 11. Тормозные характеристики рекуператора с плоским коллектором с сеточным блоком 2.  $U_0 \approx 10$  кВ.

на напряжение на нем максимально. Обычно для этой же точки КПД рекуператора максимален: так, для характеристики рис. 11 формула (6) дает  $\eta = 0,49$ . Точкой *B* отмечено напряжение коллектора, при котором ток на коллектор равен нулю. С точностью до погрешности измерений  $U_{col(B)} \simeq U_0$ . Величина  $\Delta U$ , названная «глубиной торможения» пучка и равная

$$\Delta U = U_{col(B)} - U_{col(A)} \simeq U_0 - U_{col(A)}, \quad (9)$$

является важной характеристикой рекуператора. Ясно, что для повышения эффективности коллектора необходимо минимизировать величину  $\Delta U$ . На рис. 12 нанесены экспериментальные точки зависимости «глубины торможения»  $\Delta U$  от коллекторного тока.

### 6. РЕКУПЕРАТОР С КОЛЛЕКТОРОМ «ЦИЛИНДР ФАРАДЕЯ»

Схема рекуператора с коллектором «цилиндр Фарадея» представлена на рис. 13. Задняя стенка коллектора выполнена из титановой фольги толщиной 10 мкм, изолирована от боковых стенок и имеет независимый электрический вывод. Глубина цилиндра выбиралась от 130 до 210 мм. Внутренний диаметр цилиндра 125 мм. При работе с сеточным блоком 1 диаметр входного отверстия цилиндра выбирался равным 65 мм, а при работе с сеточным блоком 2 — 65 либо 110 мм.

Типичные тормозные характеристики приведены на рис. 14, 15. На рис. 14 приведены результаты экспериментов с сеточным блоком 1, с пучком  $U_0 = 5$  кВ, вырезанным диафрагмой  $\varnothing 20$  мм. Для кривых 1, 4 ( $U_s = -1$  кВ) КПД = 75% является максимально достигнутым в обсуждаемых экспериментах. Характеристики, приведенные на рис. 15, получены с сеточным блоком 2.

При увеличении входного отверстия коллектора с 65 мм до 110 мм вдвое увеличилась глубина торможения  $\Delta U$  и, соответственно, КПД снизился с 48 до 39%. Зависимость «глубины торможения» от рекуперированного тока  $I_{col}$  для цилиндров с отверстиями соответствовала «закону  $3/2$ » (рис. 12).

Были проведены также эксперименты с коллектором типа «цилиндр Фарадея», входное отверстие которого закрыто сеткой. Оказалось, что в таком рекуператоре глубина торможения  $\Delta U$  слабо зависит от величины коллекторного тока в диапазоне 0,1 — 0,3 А и находится в тех же пределах, что и для рекуператора с плоским

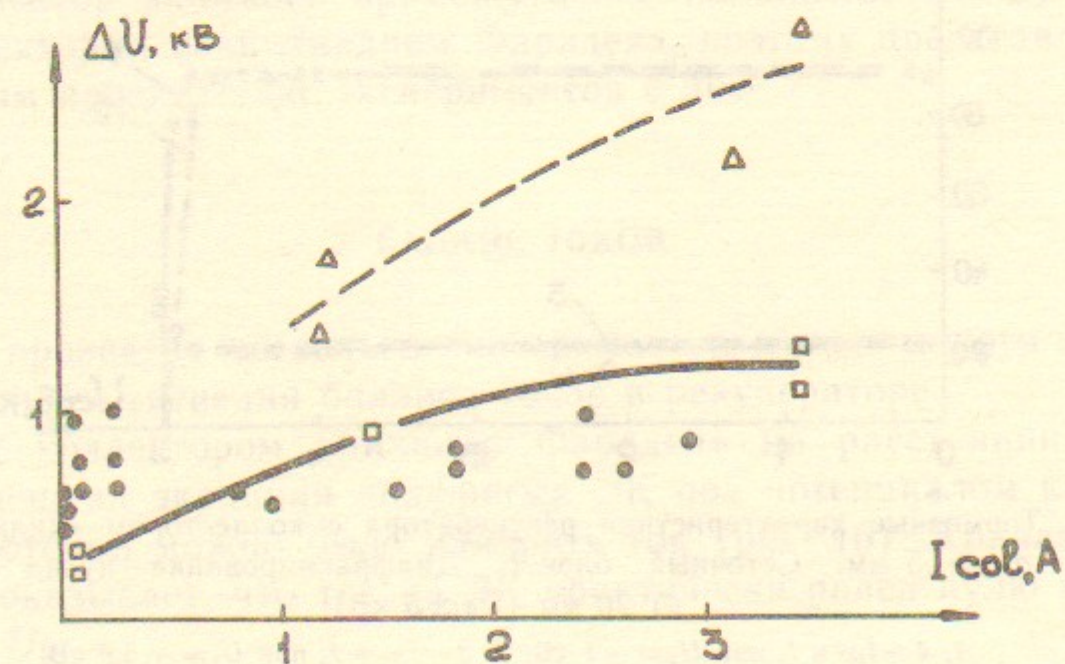


Рис. 12. Зависимость глубины торможения  $\Delta U$  от рекуперированного тока  $I_{col}$ :  
● — плоский коллектор; □ — коллектор «цилиндр Фарадея» с  $d_{col} = 65$  мм, ▲ — то же, с  $d_{col} = 110$  мм.

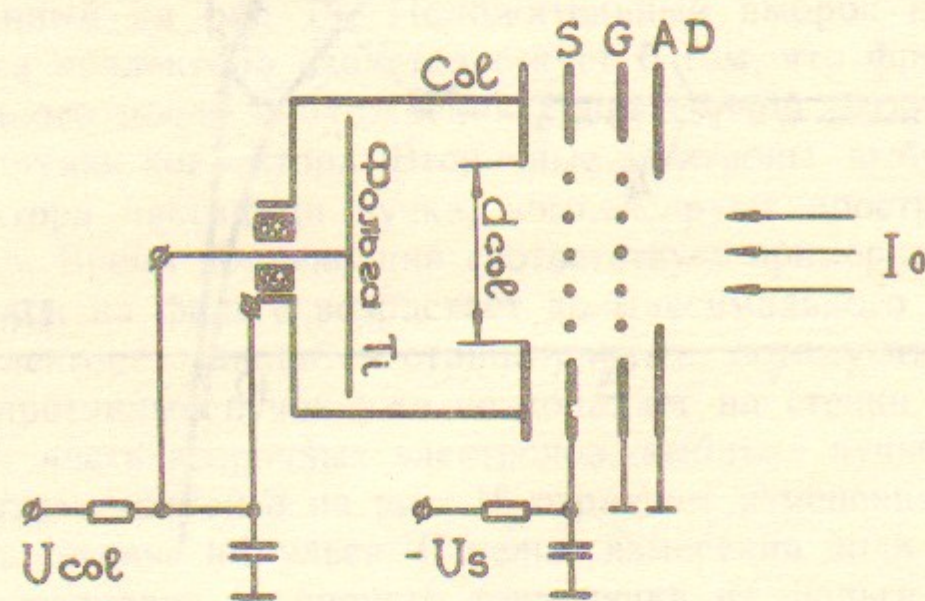


Рис. 13. Схема рекуператора с коллектором «цилиндр Фарадея».

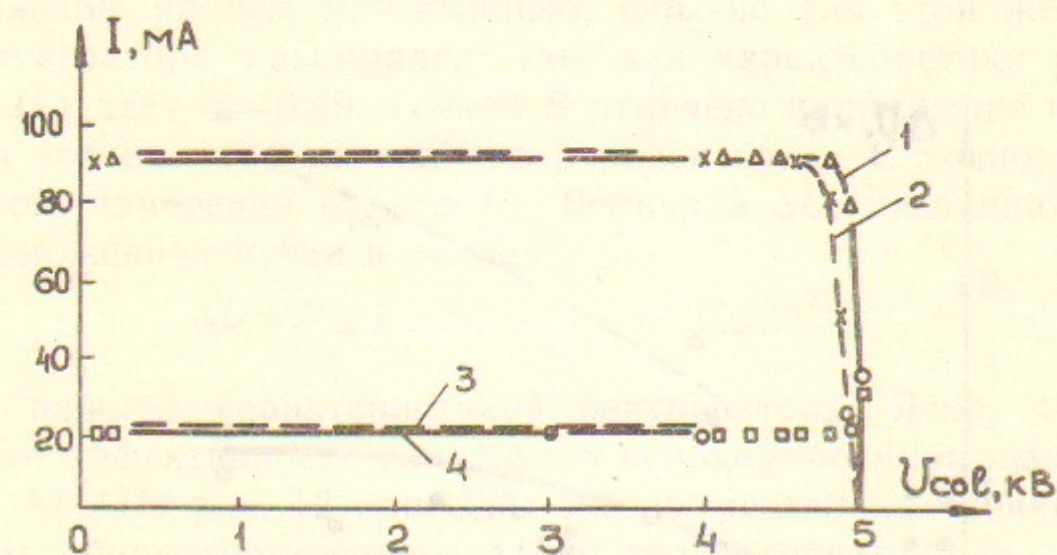


Рис. 14. Тормозные характеристики рекуператора с коллектором «цилиндр Фарадея» с  $d_{col}=65$  мм. Сеточный блок 1. Диафрагмирование пучка отверстием  $\varnothing 20$  мм ( $U_0 \approx 5$  кВ):

1, 4 —  $I_{col}$  и  $I_s$  при  $U_s = -1$  кВ; 2, 3 —  $I_{col}$  и  $I_s$  при  $U_s = -5,6$  кВ.

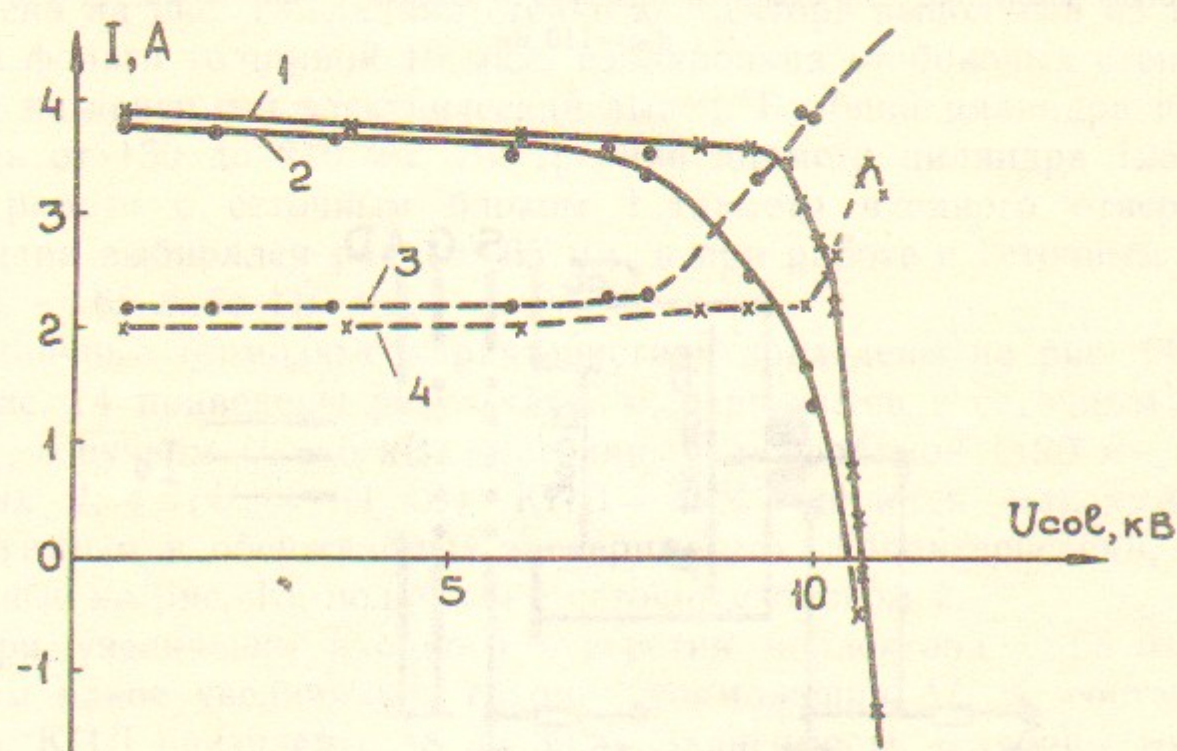


Рис. 15. Тормозные характеристики рекуператора с коллектором «цилиндр Фарадея» ( $U_0 \approx 10$  кВ):

1, 4 — токи коллектора и супрессора,  $d_{col}=65$  мм,  $\eta \approx 48\%$ ; 2, 3 — то же,  $d_{col}=110$  мм,  $\eta \approx 39\%$ .

коллектором. КПД рекуператора при плотности пучка  $5 \text{ mA/cm}^2$  составляет  $67\%$ , а при  $200 \text{ mA/cm}^2$  —  $45\%$ . По эффективности этот коллектор занимает промежуточное положение между плоским коллектором и «цилиндром Фарадея», поэтому представляется интересным продолжение экспериментов с ним.

## 7. БАЛАНС ТОКОВ

Было проведено несколько экспериментов методического характера с целью выяснения баланса токов в рекуператоре.

Перед коллектором «цилиндр Фарадея» на расстоянии  $1$  мм была помещена экранная диафрагма ЭК под потенциалом коллектора, с которой можно было измерять ток (рис. 16). Кривая 3 на рис. 17 показывает, что ток на ЭК практически равен нулю вплоть до  $U_{col} \approx U_0$ .

Изменяя потенциал фольги (рис. 13) относительно коллектора и измеряя токи на фольгу и коллектор, можно определить вклад потока нейтральных атомов, образующихся вблизи источника и в дрейфовой камере. Тормозные характеристики для токов на фольгу и стенки коллектора при  $U_{col} = U_\phi$  приведены на рис. 18, а осциллограммы зависимости этих же токов от времени имеют вид, представленный на рис. 19. Положительный выброс на осциллограмме тока коллектора свидетельствует о том, что фронт нескомпенсированного после прохождения супрессорной сетки пучка попадает на стенки коллектора. Вторичные электроны, выбитые со стенок коллектора частицами пучка, компенсируют пространственный заряд пучка. Время компенсации соответствует примерно  $50$  мкс. За это время ток на фольге возрастает до максимального значения, а ток на коллекторе становится отрицательным, потому что компенсированный протонный пучок уже не попадает на стенки, но зато на них стекает часть вторичных электронов, выбитых пучком из фольги. «Размытие» кривой 3 на рис. 18 отражает изменение коллекторного тока в течение импульса. С целью измерения доли эквивалентного тока нейтралов от полного тока пучка на фольге с помощью варисторов (рис. 20,а) задавался потенциал  $U_\phi$ :

$$U_\phi = U_{col} - \delta U, \quad (10)$$

отличающийся на постоянную величину  $\delta U$  от коллекторного. Зависимости  $I_{col} = f(U_{col})$  и  $I_\phi = f(U_{col})$  при  $\delta U = 1000$  В приведены

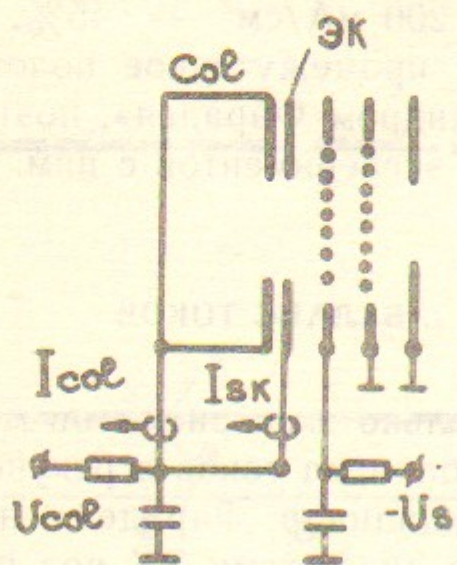


Рис. 16. Схема эксперимента с экраном ЭК на коллекторе.

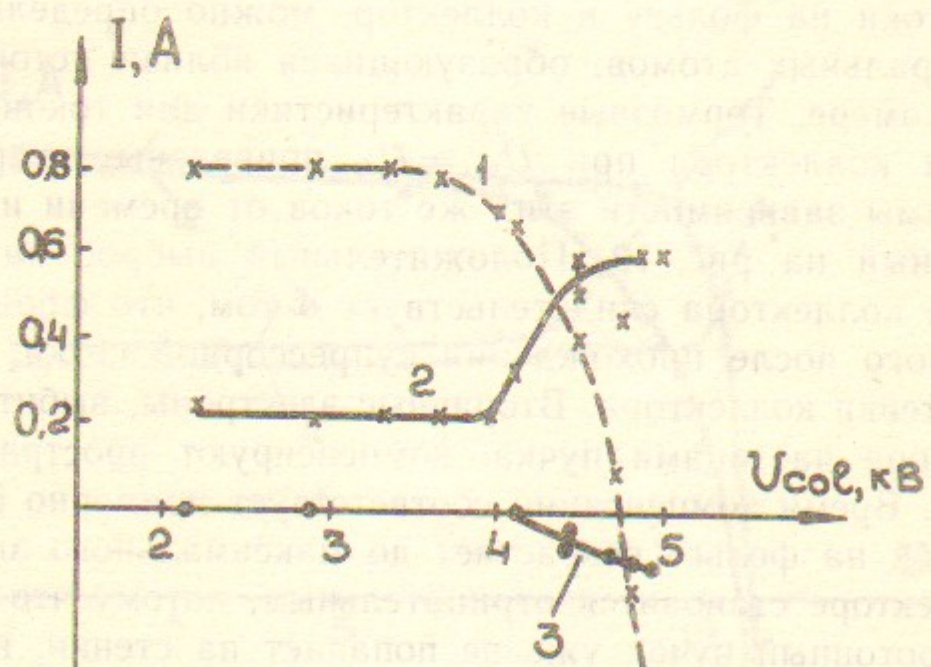


Рис. 17. Тормозные характеристики с коллектором «цилиндр Фарадея» и экраном ЭК ( $U_0 \approx 5$  кВ):

1 — коллекторный ток  $I_{col}$ ; 3 — ток на экран  $I_{эк}$ .

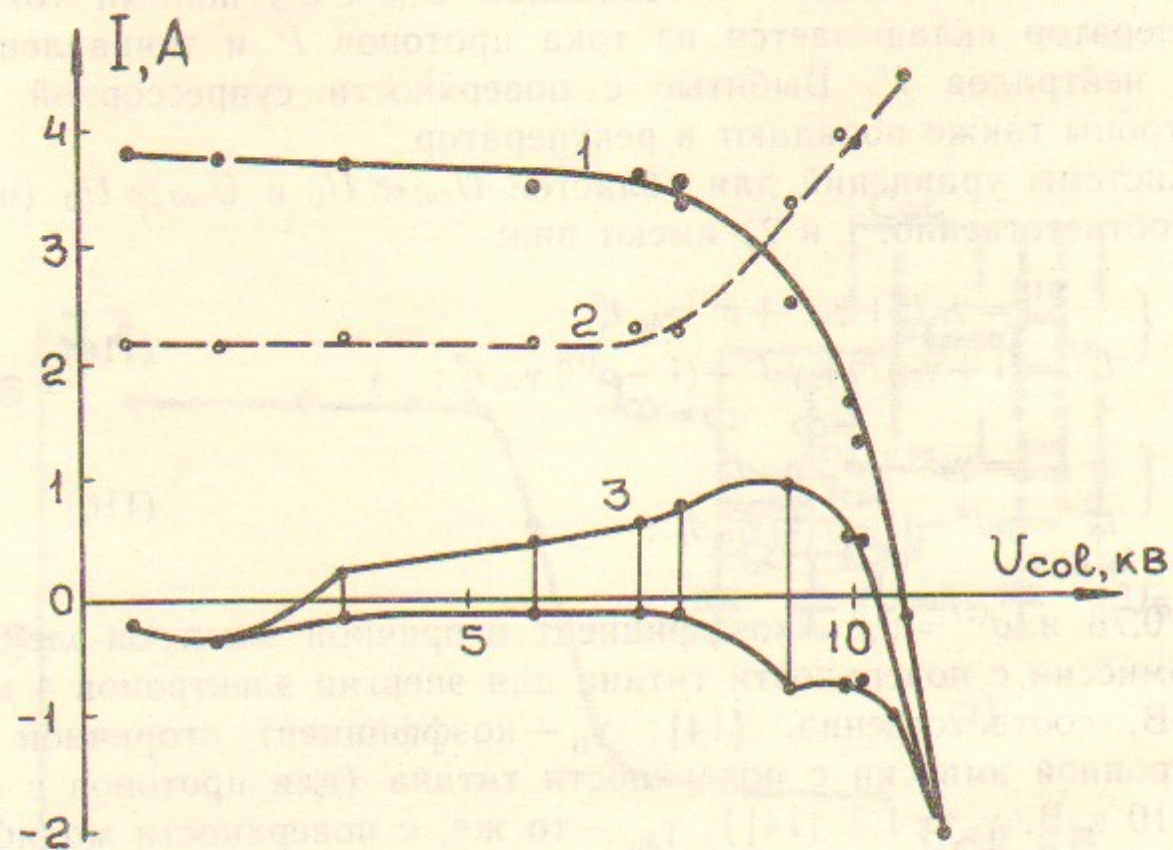


Рис. 18. Тормозные характеристики при  $U_{col} = U_\phi$ :

1 — ток на фольгу; 2 — ток на супрессор; 3 — коллекторный ток.

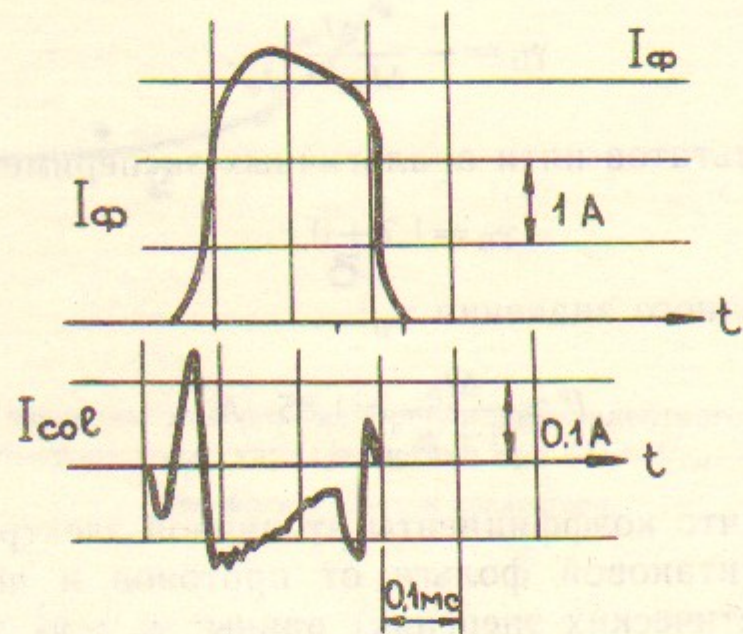


Рис. 19. Осциллограммы токов на фольгу  $I_\phi$  и стенки коллектора «цилиндр Фарадея»  $I_{col}$ :  $U_0 \approx 10$  кВ;  $U_{col} = U_\phi \approx 6$  кВ;  $\rho \approx 2 \cdot 10^{-5}$  Тор.

на рис. 20,б. В области потенциалов  $U_{col} < U_{\phi}$  полный ток  $I_0$  в рекуператор складывается из тока протонов  $I^p$  и эквивалентного тока нейтралов  $I^n$ . Выбитые с поверхности супрессорной сетки электроны также попадают в рекуператор.

Системы уравнений для областей  $U_{col} \ll U_0$  и  $U_{col} \gg U_0$  (индексы, соответственно, 1 и 2) имеют вид:

$$\begin{cases} -I_{col}^{(1)} = \gamma_{Ti} I^p + \gamma_0 I^n + \sigma^{(1)} \gamma_{Mo} I_s^p \\ I_{\phi}^{(1)} = (1 + \gamma_{Ti}) I^p + \gamma_0 I^n - (1 - \sigma^{(1)}) \gamma_{Mo} I_s^p; \end{cases} \quad (11a)$$

$$\begin{cases} -I_{col}^{(2)} = \gamma_0 I^n + \sigma^{(2)} \gamma_{Mo} I_s^p, \\ I_{\phi}^{(2)} = \gamma_0 I^n - (1 - \sigma^{(2)}) \gamma_{Mo} I_s^p; \end{cases} \quad (11б)$$

$\sigma^{(1)} = 0,78$  и  $\sigma^{(2)} = 0,5$  — коэффициент вторичной электрон-электронной эмиссии с поверхности титана для энергии электронов 4 кэВ и 14 кэВ, соответственно, [14];  $\gamma_{Ti}$  — коэффициент вторичной ион-электронной эмиссии с поверхности титана (для протонов с энергией 10 кэВ,  $\gamma_{Ti} \approx 1,5$  [14]);  $\gamma_{Mo}$  — то же, с поверхности молибдена ( $\gamma_{Mo} \approx 1,0$  [14]);  $\gamma_0$  — коэффициент нейтрал-электронной эмиссии с поверхности титана;  $I_s^p$  — ток протонов на супрессор;  $I^p$  — ток протонов на фольгу;  $I^n$  — эквивалентный ток нейтралов.

Решение этой системы дает:

$$\gamma_{Ti} = - \frac{\Delta I_{col}}{\Delta I_{col} - \Delta I_{\phi}}. \quad (12)$$

Обработка результатов пяти аналогичных экспериментов дает:

$$\gamma_{Ti} = 1,7 \pm 0,1.$$

С учетом полученного значения  $\gamma_{Ti}$ :

$$I^p \approx \frac{\Delta I_{\phi}}{1 + \gamma_{Ti}} \approx 1,85 \text{ А.}$$

Если допустить, что коэффициенты вторичной электрон-электронной эмиссии с поверхности титановой фольги от протонов и нейтралов (при одинаковых кинетических энергиях) равны:  $\gamma_{Ti} \approx \gamma_0$ , то можно найти эквивалентный ток нейтралов:

$$I^n \approx 0,68 \text{ А.}$$

Таким образом, на входе в рекуператор пучок более чем на 30% состоит из нейтралов. Рабочий вакуум в установке около  $10^{-5}$

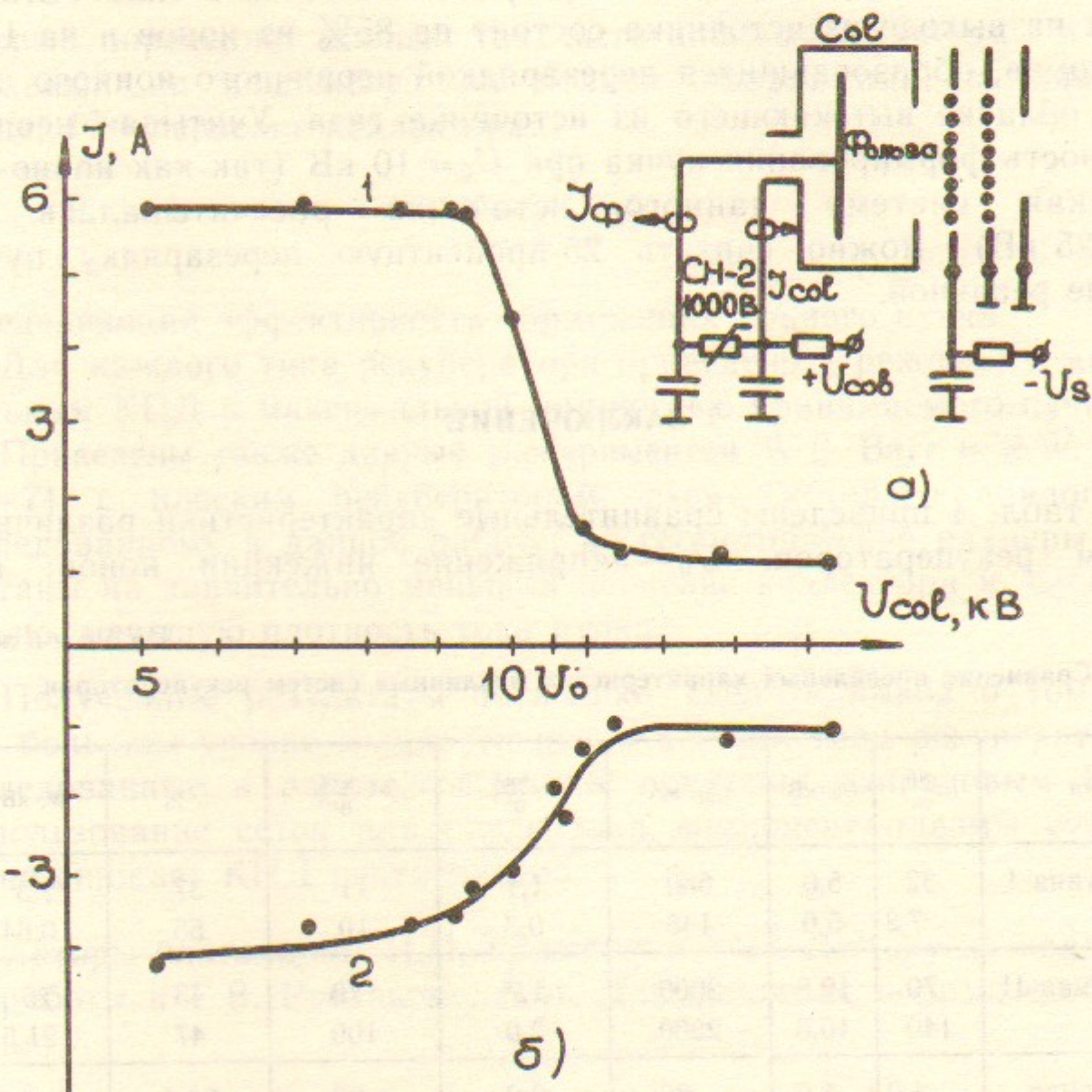


Рис. 20. а — Схема эксперимента для измерения эквивалентного тока нейтралов в рекуператор; б — тормозные характеристики при  $\delta U = U_{col} - U_{\phi} = 1000 \text{ В}$ :

1 — ток фольги; 2 — ток коллектора.

Тор, что соответствует плотности остаточного газа около  $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . Принимая сечение перезарядки  $2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ , получим, что при длине дрейфовой камеры 1 м доля перезарядившихся ионов составит 6%. По данным [10] для источников типа «Старт» пучок на выходе из источника состоит на 85% из ионов и на 15% из атомов, образовавшихся перезарядкой первичного ионного пучка в облачке вытекающего из источника газа. Учитывая неоптимальность формирования пучка при  $U_0 = 10 \text{ кВ}$  (так как ионно-оптическая система данного источника рассчитывалась на  $U_0 \approx 25 \text{ кВ}$ ), можно считать 25-процентную перезарядку пучка вполне реальной.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В табл. 4 приведены сравнительные характеристики различных систем рекуператоров.  $U_0$  — напряжение инжекции ионов;  $I_{col}^*$ ,

Таблица 4

Сравнение предельных характеристик различных систем рекуператоров

Тип	$j_0, \frac{\text{мА}}{\text{см}^2}$	$U_0, \text{кВ}$	$I_{col}^*, \text{мА}$	$P, \frac{\text{мкА}}{\text{В}^{3/2}}$	$P^*, \frac{\text{мкА}}{\text{В}^{3/2}}$	$\eta, \%$	$W, \text{кВт}$
Пластина I	32	5,0	650	1,1	11	37	2,3
	7,2	5,0	145	0,3	10	55	0,64
Пластина II	70	10,6	2600	1,7	70	43	26
	140	10,6	2200	2,0	100	47	21,5
Цилиндр без сетки	4,0	5,0	80	0,2	80	72,4	0,4
	205	10,6	3400	2,0	104	48	30
Цилиндр с сеткой	5	5,0	85	0,2	8	67	0,4
	200	10,6	3300	2,0	105	45	29
Вагг, Моиг [5]	0,7	100	30	$9 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$	77	2,7
Вагг, Моиг [6]	1,25	100	50	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-1}$	64	4,7

$U_{col}^*$  — ток и напряжение коллектора, при которых рекуперированная мощность на коллекторе  $W = I_{col}^* U_{col}^*$  максимальна;  $P$  — входной

первеанс рекуператора:

$$P = \frac{I_{col}^*}{(U_{col}^* + |U_s|)^{3/2}}, \quad (13)$$

который определяет ионный ток, вытягиваемый из плазмы и принимаемый на коллектор при полном напряжении на плоском диоде;  $P^*$  — первеанс коллектора:

$$P^* = \frac{I_{col}}{(\Delta U)^{3/2}}, \quad (14)$$

определяющий эффективность торможения ионного пучка.

Для каждого типа рекуператора приведено 2 режима: с максимальным КПД и максимальной мощностью принимаемого пучка.

Приведены также данные экспериментов W.L. Вагг и R.W. Моиг [5—7] с плоским рекуператором, схема которого аналогична исследованному в данной работе, но геометрические размеры рассчитаны на значительно меньший первеанс коллектора и, следовательно, меньшую плотность тока пучка.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что при большом уровне мощности пучка все три типа рекуператоров, исследованные в работе, обладают примерно одинаковым КПД. Использование сеток для разделения компонент плазмы существенно снижает КПД рекуператора.

Авторы благодарны И.Н. Головину и Г.И. Димову за поддержку работы и Г.В. Рослякову, В.И. Давыденко за полезные обсуждения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Post R. B.E.N.S. Nuclear Fusion Reactor Conference. September, 1960, Paper 2.1, p.88.*
2. *Moir R. et al. IV IAEA Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research. June, 1977, CN-28/k-1.*
3. *Виноградова О.А., Димитров С.К., Житнухин А.М. и др. Прямое преобразование энергии заряженных частиц с помощью системы скошенных диафрагм. — Ат. энергия, 1972, т.33, вып.1, с.586—589.*
4. *Виноградова О.А., Димитров С.К., Луцько А.С. и др. Прямое преобразование энергии моноэнергетических пучков ионов с компенсацией объемного заряда. — Ат. энергия, 1977, т.42, вып.5, с.411—412.*
5. *Barr W.L., Moir R.W., Hamilton G.W., Lietzke A.F. Tests of High-Power Direct Conversion on Beams and Plasma. — Proc. 8th Symp. Eng Problems of Fusion Research. 1979, v.2, p.1029—1033.*
6. *Barr W.L., Moir R.W., Hamilton G.W. Experimental Results from a Beam Direct Converter at 100 kV. — Journ. of Fusion Energy, 1982, N 2, v.2, p.131—143.*
7. *Barr W.L. and Moir R.W. Test Results on Plasma Direct Converters. — Nuclear Tech./Fusion, 1983, v.3, № 1, p.98—111.*
8. *Куделайнен В.И., Мешков И.Н., Пархомчук В.В. и др. Глубокое торможение электронного пучка в системе с продольным магнитным полем. — Журнал техн. физ., 1976, т.46, № 8, с.1678.*
9. *Абрамян Е.А., Шарапа А.И. Эксперименты по рекуперации электронного пучка. — ПТЭ, № 2, 1971.*
10. *Давыденко В.И., Димов Г.И., Морозов И.И., Росляков Г.В. Многоамперный импульсный источник протонов. — Препринт 82-49. ИЯФ СО АН СССР. Новосибирск, 1982.*
11. *Давыденко В.И. Формирование высокоперевансных ионных и атомных пучков. — Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1986.*
12. *Димов Г.И., Росляков Г.В., Савченко О.Я. Формирование потока ионов и нейтральных атомов из плазмы импульсного дугового источника. — Препринт ИЯФ СО АН СССР. Новосибирск, 1967.*
13. *Тиунов М.А., Фомель Б.М., Яковлев В.П. SAM—Интерактивная программа для расчета электронных пушек на мини-ЭВМ. — Препринт ИЯФ СО АН СССР 87-35. Новосибирск, 1987.*
14. *Physics Division. Atomic Data for Controlled Fusion Research. Febr., 1977. Oak Ridge, Tennessee.*

*В.И. Гусельников, И.Н. Мешков, Т.И. Оришич,  
В.Я. Савкин, В.П. Фунтиков*

### Рекуперация энергии интенсивного пучка протонов, компенсированного медленными электронами

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 5 августа 1988 г.  
Подписано в печать 7.09 1988 г. МН 08476  
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 2,2 печ.л., 1,8 уч.-изд.л.  
Тираж 200 экз. Бесплатно. Заказ № 122

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-  
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и  
отпечатано на ротапинтере Института ядерной физики  
СО АН СССР,  
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*