

4-92 СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР 2  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

В.Е.Чуприянов

ЭЛЕКТРОННЫЙ ИОНИЗАТОР ОСТА-  
ТОЧНОГО ГАЗА НА УСКОРИТЕЛЬНОЙ  
ДОРОЖКЕ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ  
ИНТЕНСИВНОГО КОМПЕНСИРОВАН-  
НОГО ПРОТОННОГО ПУЧКА

ПРЕПРИНТ 80-154

БИБЛИОТЕКА  
Института ядерной  
Физики СО АН СССР  
ИЯФ СО АН СССР



Новосибирск

В. Е. Чуприянов

ЭЛЕКТРОННЫЙ ИОНИЗАТОР ОСТАТОЧНОГО ГАЗА НА УСКОРИТЕЛЬНОЙ  
ДОРОЖКЕ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ИНТЕНСИВНОГО КОМПЕНСИРОВАННОГО  
ПРОТОННОГО ПУЧКА

А Н Н О Т А Ц И Я

Для стабилизации двухпучковой неустойчивости интенсивного компенсированного протонного пучка необходимо на дорожке накопителя создать плазму с плотностью  $3 \div 4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ .

Для этих целей предлагается метод, основанный на ионизации остаточного газа в накопителе потоком электронов, движущихся вдоль ведущего магнитного поля. Высокая эффективность и простота конструкции достигается за счет преобразования первичного электронного потока, вытягиваемого с многопроволочного термокатода с энергией  $\sim 900 \text{ эВ}$  в обратный поток электронов с энергией  $\sim 100 \text{ эВ}$  на вторично-эмиссионном конверторе. Коэффициент преобразования электронов  $\sim 1$ . Показано, что предложенная схема ионизатора остаточного газа позволяет легко получать требуемую плотность плазмы при достаточно низкой плотности газа.

Описывается конструкция ионизатора и приводятся результаты экспериментов по исследованию его работы. Изучено гашение различных частей ионизатора в импульсном и постоянном режимах накала термокатода.

Приводятся результаты экспериментов по накоплению протонов в присутствии плазмы, создаваемой на дорожке накопителя ионизаторами.

## Введение

С целью получения больших протонных токов в ускорителях в ИЯФ СО АН СССР были проведены экспериментальные исследования компенсации пространственного заряда протонного пучка облаком электронов, рождающихся за счет ионизации остаточного газа протонами /1-6/. Эксперименты проводились на кольцевом накопителе с перезарядной инъекцией, описанном в /4/. Средний радиус орбиты  $\sim 1$  м. Энергия протонов в пучке  $\sim 1$  МэВ. Было установлено, что основным препятствием для повышения тока компенсированного протонного пучка является поперечная двухпучковая протон-электронная неустойчивость /1,7/, которая подавляется при достижении на дорожке накопителя некоторой плотности плазмы  $n_e \approx 3 + 4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ , образующейся в результате взаимодействия быстрых протонов с остаточным газом /6/. В оптимальных условиях был получен устойчивый компенсированный пучок протонов в накопителе с током, на порядок превышающем предельный по пространственному заряду. Полное число накопленных протонов составило  $N_p = 1.8 \cdot 10^{12}$ .

Из-за малой эффективности ионизации остаточного газа быстрыми протонами необходимая плотность плазмы достигалась при довольно высоком давлении газа на дорожке накопителя ( $\sim 1,7 \cdot 10^{-3}$  тор дейтерия). И даже в этих условиях сам протонный пучок не может обеспечить необходимую плотность плазмы. Порогом по плотности остаточного газа является переход к саморазмножению плазмы за счет эффективной ионизации молекул газа электронами плазмы при реализации условия:

$$n_0 < \sigma_e v_e \tau_{ж} \geq 1 \quad (I)$$

где  $n_0$  — плотность газа на дорожке накопителя;  
 $\sigma_e$  — сечение ионизации молекул газа электронами плазмы;  
 $v_e$  — скорость электронов плазмы;  
 $\tau_{ж}$  — время жизни ионов плазмы.

Энергию электроны получают в результате появления двухпучковой

неустойчивости, особенно в начале процесса накопления /6/.

Время жизни устойчивого компенсированного протонного пучка ограничивалось многократным рассеянием и энергетическими потерями протонов в газе на дорожке накопителя и составляло  $50 + 80$  оборотов без компенсации энергетических потерь протонов и  $80 + 120$  с их частичной компенсацией за счет индукционного ускорения. Из-за этого генерация плазмы за счет ионизации молекул газа протонами не может, как правило, быть использована для подавления двухпучковой неустойчивости в ускорителях. Поэтому в ускорителях необходимо реализовать другие методы генерации плазмы.

#### Генерация плазмы с помощью потока электронов

Для генерации плазмы на дорожке накопителя нами была выбрана ионизация остаточного газа потоком электронов, движущихся вдоль магнитного поля, перпендикулярно протонному пучку. В качестве источника электронов был принят прямонакальный многопроволочный термокатод, расположенный над или под протонным пучком. Возможность практической реализации такого метода в большой степени зависит от эффективности использования электронов. Оптимальной для генерации плазмы является область энергий электронов 50-150 эВ. Однако получать с термокатодов большие электронные токи с такой энергией достаточно сложно из-за требования малых зазоров в вытягивающей системе. Поэтому в выбранной схеме ионизатора первичный поток электронов с термокатода с относительно высокой энергией после пересечения апертуры накопителя преобразуется на конверторе в обратный поток электронов с энергией около 100 эВ. Конвертором служит плоская холодная пластина с коэффициентом вторичной электронной эмиссии  $\alpha > 1$  с близко расположенной к ее поверхности вытягивающей мелкоячеистой сеткой. Коэффициент вторичной электронной эмиссии для большинства металлов имеет широкий максимум в области энергий первичных электронов 400-1000 эВ, поэтому вытягивающее напряжение для первичных электронов может быть достаточно высоким. Имеющаяся, в принципе, возможность многократного увеличения по-

тока электронов в рабочей области за счет использования специальных материалов с  $\alpha \sim 10$  значительно снижает требования к термокатоде и вытягивающей системе первичных электронов.

Из вышеизложенных соображений за основу была принята конструкция, схематически изображенная на рис.1. Ионизатор остаточного газа состоит из двух частей: катодной и конверторной, расположенных над и под протонным пучком. Термокатод представляет собой несколько тонких проволок 1, натянутых вдоль орбиты протонного пучка. Расстояние между проволоками определяется, в основном, требованиями к однородности плазмы в области протонного пучка. Под каждой проволокой катода, параллельно ему, расположены по две нити первичной вытягивающей сетки 2 с вытягивающей целью, образованной этими нитями, шириной около 2 мм. Размер вытягивающего зазора  $\sim 1$  мм. Благодаря тому, что проволоки термокатода располагаются между вытягивающими нитями и намного тоньше вытягивающей цели, обеспечивается магнитная изоляция вытягивающего промежутка и создается поперечное электрическое поле для ударного расширения потока электронов поперек магнитного поля. Приобретение электронами поперечных скоростей в локализованных электрических полях необходимо также для ослабления неизотропной неустойчивости в образующейся плазме.

Первичный и вторичный вытягивающие (отрицательные) потенциалы подаются на катод и вторично-эмиссионную пластину конвертора соответственно. Катодная и конверторная сетки заземлены. Размеры вытягивающих зазоров определяются исходя из закона "трех вторых". Отражательная пластина 3 гальванически соединена с катодом и служит для запираения паразитного потока электронов с термокатода на корпус ионизатора или стенки вакуумной камеры.

Для вытягивания электронных токов достаточно большой плотности при потенциале конвертора  $\sim 100$  в необходимо обеспечить достаточно малый зазор между вторично-эмиссионной пластиной конвертора 4 и его сеткой 5. Ввиду простоты геометрии и, благодаря отсутствию тепловых деформаций, выполнить это требование здесь относительно несложно. Вытягивающая сетка конвертора должна удовлетворять при этом следующим условиям:

$$d_2 \ll d_k \quad ; \quad l_2 < \Delta_2 \quad ; \quad d_2 \ll l_2 \quad ; \quad (2)$$

где  $d_2$  — диаметр проволок сетки конвертора;  
 $d_k$  — диаметр проволок катода;  
 $l_2$  — шаг сетки конвертора;  
 $\Delta_2$  — расстояние между вторично-эмиссионной пластиной и сеткой конвертора

Ионизатор работает следующим образом. После прогрева термокатода на него подается прямоугольный импульс вытягивающего напряжения —  $U_{\text{кат}}$ . Ускорившись в первом зазоре катод-сетка до энергии  $eU_{\text{кат}}$ , поток электронов со средней плотностью  $\bar{j}_1$  движется в магнитном поле к конвертору. Благодаря наличию в области вытягивания поперечных электрических полей и полей пространственного заряда, локальная плотность тока электронов при этом падает в несколько раз. Поток электронов с энергией  $e(U_{\text{кат}} - U_{\text{конв}})$  и средней плотностью  $h\bar{j}_1$  (где  $h$  — прозрачность сетки конвертора) попадает на конверторную пластину и вызывает в ней вторичную электронную эмиссию. Поток вторичных электронов со средней плотностью

$$\bar{j}_2 \approx h\alpha\bar{j}_1 \quad (3)$$

направляется обратно в апертуру. Ввиду того, что  $U_{\text{кат}} \gg U_{\text{конв}}$ , поток вторичных электронов, отразившись в электрическом поле катода, возвращается обратно на конвертор. Если удовлетворить условию  $dU_{\text{конв}}/dt > 0$ , то при наличии достаточно сильного магнитного поля вторичные электроны будут совершать колебания между пластиной конвертора и катодом до тех пор пока за счет рассеяния на молекулах остаточного газа или под воздействием поперечных электрических полей не попадут на одну из сеток.

Применительно к реальным условиям нашего накопителя с магнитным полем в поворотных магнитах на орбите 3.2 кГс при использовании легко доступных материалов нами был создан ионизатор остаточного газа со следующими характеристиками.

Катод изготовлен из торированного вольфрама с эмиссионной

способностью при рабочей температуре  $\sim 1800^\circ\text{C}$   $j_3 = 3\text{A}/\text{cm}^2$ . Диаметр проволок катода  $d_k = 0,19$  мм, расстояние между проволоками  $l_k = 7$  мм; вытягивающий зазор  $\Delta_1 = 1,2$  мм. Первичная вытягивающая сетка изготовлена из нихромовой проволоки диаметром 0,2 мм.

В качестве материала конверторной пластины была выбрана медь с  $\alpha = 1,3$  в области энергий первичных электронов от 600 до 1000 эВ. От применения эффективных вторично-электронных эмиттеров с  $\alpha \gg 1$  мы вынуждены были отказаться из-за их несовместимости с масляной откачкой накопителя. Сетка конвертора — тканая из молибденовой проволоки диаметром  $d_2 = 30$  мкм с квадратной ячейкой 150 x 150 мкм. Прозрачность сетки  $h = 0,7$ . Вытягивающий зазор в конверторе  $\Delta_2 = 0,7$  мм.

Для полного вытягивания эмиссионного тока  $j_3 = 3\text{A}/\text{cm}^2$  по закону "трех вторых" необходимо подать на катод напряжение  $U_{\text{кат}} \gtrsim 900$  в. Средняя плотность первичных электронов составит при этом

$$j_1 \approx j_3 \frac{\pi d_k}{2 l_k} \approx 0,13\text{A}/\text{cm}^2$$

Максимальную плотность тока первичных электронов можно оценить по формуле

$$j_1 \approx \frac{\pi}{2} j_3 \frac{d_k}{d_k + 4r_e} \quad (4)$$

где  $r_e$  — ларморовский радиус первичных электронов. Соответствующая указанным параметрам максимальная плотность тока вторичных электронов с конвертора будет равна  $j_2 = h\alpha j_1 \approx 0,7\text{A}/\text{cm}^2$ . Для вытягивания вторичных электронов с такой плотностью через зазор  $\Delta_2 = 0,7$  мм достаточно напряжения 120 в. Благодаря расположению нитей прикатодной сетки и большому шагу между ними вторичные электроны после выхода из конвертора как минимум дважды пересекают апертуру. В результате ионизатор создает в рабочей области

два потока электронов со средней плотностью  $\bar{n}_1 \approx 4,5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$  для 900-вольтовых и  $\bar{n}_2 \approx 2,6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$  для 120-вольтовых.

Время образования ионов с плотностью, равной плотности ионизирующих электронов равно:

$$\tau_u \approx \frac{e(\bar{n}_1 + \bar{n}_2)}{n_0 j_1 (\delta_1 + 2\eta\delta_2)} \quad (5)$$

где  $\delta_1, \delta_2$  - сечение ионизации газа в ионизаторе первичными и вторичными электронами соответственно;

$n_0$  - плотность газа в ионизаторе.

При давлении остаточного газа на дорожке накопителя  $P_0 = 1 \cdot 10^{-5}$  тор время  $\tau_u \approx 10^{-5}$  сек.

Таким образом, выбранная схема генерации плазмы в принципе может при достаточно малом давлении газа за достаточно короткое время  $\sim 10^{-5}$  сек создавать на ускорительной дорожке плазму с плотностью ионов  $\bar{n}_i = \bar{n}_1 + \bar{n}_2 \approx 3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$

#### Исследование гажения проволочных катодов, деталей ионизации и стенок вакуумной камеры

Плотность газа в ионизаторе является важнейшим параметром, определяющим как работу самого ионизатора, так и время жизни протонного пучка на орбите. Предварительные эксперименты показали, что давление газов в ионизаторе, обусловленное гажением при его работе в импульсном режиме накала термокатода, на  $1,5-2$  порядка превышает минимальное давление остаточного газа в накопителе. Для выяснения величины вклада в этот эффект различных частей ионизатора и изучения возможностей снижения гажения был поставлен специальный эксперимент в упрощенной геометрии и без магнитного поля, затрудняющего импульсные измерения плотности газов.

В вакуумную камеру с рабочим давлением  $\sim 2 \cdot 10^{-5}$  тор помещались две катодные проволоки, окруженные металлическим

экраном (см. рис.2). Изучалось гажение одной из проволок при ее нагреве короткими импульсами тока и десорбция молекул газа с экрана при его импульсном облучении светом и электронами в различных вариантах катодных проволок и материала экрана. Давление газа в камере измерялось с помощью преобразователя ПМИ-2 с удаленным стеклянным корпусом. Исследуемая проволока питалась двумя источниками тока - импульсным для быстрого прогрева и постоянным для предварительного обезгаживания. Температура проволоки задавалась длительностью импульса прогрева и током постоянного накала. Вторая проволока нагревалась постоянным током до температуры  $1800^\circ + 2000^\circ \text{C}$  и позволяла производить непрерывное обезгаживание экрана за счет фотодесорбции. Во время измерения отгаживания проволоки для запираания потока электронов на экран на нее подавалось положительное напряжение. Экран заземлялся.

При импульсном прогреве проволок из торированного вольфрама до температуры  $\sim 1800^\circ \text{C}$  количество молекул газа, десорбированного за импульс с единицы поверхности зависело от толщины проволок и составляло при частоте повторения импульсов накала  $0,1 \text{ Гц}$   $2 + 3,2 \cdot 10^{15}$  мол/см<sup>2</sup> (см. рис.3 в,г,д). Это значительно больше числа молекул, адсорбированных на гладкой поверхности при монослойном покрытии, равного  $\sim 5 \cdot 10^{14}$  мол/см<sup>2</sup> /8/. Для проволок из молибдена отгаживание, измеренное в таких же условиях, соответствует десорбции монослоя газа с гладкой поверхности (см.рис. 3а).

Зависимость количества десорбированных за импульс молекул газа от временного интервала между импульсами прогрева проволоки, представленная на рис.4, указывает на объемный характер поглощения газов торированным вольфрамом. Как следует из /8/ время покрытия при поверхностном механизме сорбции должно составлять в нашем случае  $\sim 0,1$  сек. В экспериментах насыщение проволок происходило за время  $20 + 40$  сек и зависело от их диаметра (см.рис.4).

Повышение температуры проволоки между импульсами прогрева заметно снижает ее отгаживание (см.рис.5). В этом эксперименте проволока разогревалась постоянным током, а затем

за время 5-10 мсек ее температура доводилась до  $\sim 1800^\circ\text{C}$ .

При изучении гажения экрана под воздействием бомбардирующих его электронов на проволоку после ее прогрева подавался отрицательный прямоугольный импульс вытягивающего напряжения амплитудой 800 в. На рис. 6 представлена зависимость суммарного гажения проволоки из торированного вольфрама диаметром 0,265 мм и молибденового экрана от температуры катодной проволоки при различных длительностях вытягивающего импульса. Количество газа, десорбированного с облучаемой поверхности в исследуемом диапазоне линейно зависело от длительности облучения и пропорционально электронному потоку на экран (см. рис. 7). Существенных различий в отгаживании экранов из молибдена, меди и нержавеющей стали под воздействием электронного облучения обнаружено не было.

При импульсном нагреве проволоки до рабочей температуры отмечалось отгаживание экрана и при запертой электронной эмиссии под воздействием светового облучения. Величина фотодесорбции определялась по разности отгаживаний с непрерывным обезгаживанием экрана светом от второй разогретой проволоки и без него (см. рис. 3а, б). Наблюдаемая разность отгаживаний в экспериментах составляла  $6 \pm 10 \cdot 10^{12}$  мол/см<sup>2</sup>.

Дальнейшие измерения гажения и опробование работы секции ионизаторов проводились непосредственно на протонном накопителе. Испытывались два типа секций: для камеры поворотного магнита и для прямолинейного промежутка (см. рис. 14). Длина обеих секций была равна 30 см. Длина катодных проволок - 25 см. При работе с катодами из торированного вольфрама марки ВТ-10 диаметром 0,19 мм в импульсном режиме накала при частоте повторения импульсов 0,1 Гц были получены следующие результаты. Увеличение давления в камере поворотного магнита объемом  $2 \cdot 10^3$  см<sup>3</sup> при накале одной проволоки, с запертой эмиссией и при давлении остаточного газа  $2 \cdot 10^{-5}$  тор составило  $4,5 \cdot 10^{-5}$  тор. В прямолинейном промежутке объемом  $3 \cdot 10^4$  см<sup>3</sup> при давлении остаточного газа  $4,5 \cdot 10^{-6}$  тор прирост давления в том же режиме работы ионизатора составил  $2 \cdot 10^{-6}$  тор. Эти величины близки к ожидаемым, если принять за величину десорбции газа с като-

да  $2 \cdot 10^5$  мол/см<sup>2</sup>, полученную нами ранее (см. рис. 3). Несколько меньшее против ожидаемого гажение катода в прямолинейном промежутке объясняется, по-видимому, лучшими вакуумными условиями. Дополнительный прирост давления в камере магнита из-за выгаживания стенок камеры и деталей ионизатора при работе ионизатора с вытягиванием электронов при токе эмиссии 0,7 А и длительности вытягивающего импульса 300 мсек составил  $\sim 2,5 \cdot 10^{-5}$  тор. При включении магнитного поля эта величина уменьшилась до  $\sim 1 \cdot 10^{-5}$  тор. Для прямолинейного промежутка без магнитного поля в аналогичном режиме работы ионизатора дополнительный прирост давления составил  $\sim 2,5 \cdot 10^{-6}$  тор. Повышение дополнительного выгаживания при выключении магнитного поля и относительно большая его величина в прямолинейном промежутке связаны, вероятно, с увеличением облучаемой электронами поверхности. Гажение ионизатора и стенок вакуумной камеры линейно растет с увеличением тока эмиссии и длительности вытягивающего импульса (см. рис. 8 и 9а). Прирост давления газа в прямолинейном промежутке и камере магнита описываются следующими соотношениями:

$$\Delta P_n \approx (N_n + I_0 \tau I_0) \cdot 10^{-6} \text{ тор}$$

$$\Delta P_m \approx (N_m + \tau I_0) \cdot 5 \cdot 10^{-5} \text{ тор};$$

где  $\Delta P_n$  и  $\Delta P_m$  - прирост давления газа в камерах прямолинейного промежутка и поворотного магнита соответственно

$N_n, N_m$  - число накаливаемых катодных проволок;

$\tau$  - длительность вытягивающего импульса в миллисекундах;

$I_0$  - ток эмиссии электронов в амперах.

Среднее давление на дорожке накопителя при работе ионизаторов определяется из соотношения

$$\Delta \bar{P} \approx \frac{\Delta_m \Delta P_m + \Delta_n \Delta P_n}{L},$$

где  $\Delta_n$  и  $\Delta_m$  - длина орбиты, заполненной ионизаторами в прямолинейном промежутке и в камерах по-

воротных магнитов соответственно;  
 $L$  — полная длина орбиты.

Для планируемого размещения секции ионизаторов в накопителе

$$\Delta \bar{P} \approx 0,38 \Delta P_M + 0,25 \Delta P_n . \text{ Учитывая, что}$$

$$\Delta P_M \gg \Delta P_n , \text{ получим}$$

$$\Delta P \approx 0,4 \Delta P_M \quad (6)$$

При полном включении секций ионизаторов (по 6 катодных проволочек), токе эмиссии электронов в секции  $I_{\text{э}} = 2 \text{ А}$  и длительности вытягивающего импульса  $\tau = 300 \text{ мксек}$   $\Delta P \approx 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ тор}$ . При этом ожидаемая средняя плотность плазмы в ионизаторах  $\sim 10^9 \text{ см}^{-3}$ . Ввиду того, что порог по давлению азота на орбите для стабилизации двухпучковой неустойчивости равен  $\bar{P} = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ тор}$ , в этом режиме мы еще можем выделить эффект от влияния плазмы на устойчивость интенсивного компенсированного протонного пучка. Однако практического значения от применения ионизации остаточного газа системой на основе термокатодов можно ожидать только, приняв меры по существенному снижению гажения.

В этом аспекте нами была предпринята попытка изучить, что может дать использование постоянного накала катодов без принятия специальных мер по уменьшению выгаживания поверхностей, облучаемых электронами. Эксперименты проводились с ионизатором стандартной конструкции (см. рис. 14), часть катодов которого была изготовлена из иридий-лантановой проволоки диаметром 0,2 мм. Ионизатор помещался в вакуумную камеру прямолинейного промежутка. Катоды нагревались переменным током промышленной частоты.

Работа с катодами из торированного вольфрама в постоянном режиме накала оказалась невозможной из-за сильного гажения изоляторов подвеса катодов, изготовленных из электрофарфора, при мощности накала  $\sim 100 \text{ Вт}$ . Ток эмиссии электронов с одной проволоки не превышал 0,3 А.

Для иридий-лантанового катода плотность тока эмиссии электронов  $I \text{ А/см}^2$  достигается при температуре  $\sim 1500^\circ \text{С}$ . Для получения такой плотности тока эмиссии с катода из лан-

танированного иридия в наших экспериментах было достаточно мощности накала 40 Вт. Гажения изоляторов и других частей конструкции при запертой эмиссии электронов обнаружено не было. Рабочее давление остаточного газа в камере во время экспериментов было  $1,5 + 2 \cdot 10^{-6} \text{ тор}$ . Отгаживание поверхностей, облучаемых электронами, при длительности вытягивающего импульса 300 мксек приводило к приросту давления за импульс  $\Delta P_n = I \cdot 10^{-6} \text{ тор}$  при  $I_{\text{э}} = 0,6 \text{ А}$  и  $\Delta P_n = 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ тор}$  при  $I_{\text{э}} = 2 \text{ А}$ . Вдвое меньше, чем в экспериментах с импульсным накалом отгаживание поверхностей, облучаемых электронами, связано, вероятно, с более высоким вакуумом в камере во время этих экспериментов, а также с тем, что эти поверхности находились под постоянным облучением светом (см. рис. 3а, б) и были нагреты до температуры  $\sim 150^\circ \text{С}$ .

Имеющиеся в нашем распоряжении опытные образцы проволоки из лантанированного иридия из-за отсутствия отработанной технологии изготовления обладали большой неравномерностью сечения. Температура и эмиссионная способность катода из этой проволоки имели недопустимо большую неоднородность по длине. Вследствие этого от применения таких катодов на рабочих секциях ионизаторов мы вынуждены были отказаться.

В этих экспериментах было обнаружено, что после длительной работы с катодами из лантанированного иридия в постоянном режиме накала находящиеся рядом с ними катоды из торированного вольфрама приобретали эмиссионные свойства перфч. При мощности накала  $\sim 40 \text{ Вт}$  на одну проволоку плотность тока эмиссии достигала  $1 \text{ А/см}^2$ . Зависимость гажения ионизатора с использованием таким образом активированного катода из торированного вольфрама от величины тока эмиссии электронов при длительности вытягивающего импульса 300 мксек и давлении остаточного газа в камере  $I : 10^{-6} \text{ тор}$  представлена на рис. 9б. Прирост давления в камере прямолинейного промежутка накопителя в постоянном режиме накала определяется соотношением

$$\Delta P_n \approx 1,8 \cdot 10^{-6} I_{\text{э}} \tau$$

Расчетная величина для вакуумной камеры поворотного магнита



составит:

$$\Delta P_m = \frac{V_n}{V_m} \Delta P_n \approx 3 \cdot 10^5 I_0 \tau,$$

где  $V_n$  и  $V_m$  — объемы вакуумных камер прямолинейного промежутка и поворотного магнита соответственно.

При наличии магнитного поля эта величина снизится приблизительно в 2,5 раза и среднее давление в накопителе составит (6)  $\sim 3 \cdot 10^{-6}$  тор.

Таким образом, при использовании постоянного накала катодов возможно снижение гажения при работе ионизаторов до вполне приемного уровня. Причем при использовании высокотемпературных изоляторов (окись бериллия, алунд и т.п.) в качестве катодов возможно использование и торированного вольфрама.

#### Экспериментальная проверка работы ионизатора

Первоначальные эксперименты проводились на вакуумном стенде с моделью ионизатора длиной 5 см, схематически изображенного на рис. I. Модель помещалась в постоянное магнитное поле величиной 1 КГс. Предельное остаточное давление газов в камере  $2 \cdot 10^{-6}$  тор. Катод нагревался короткими импульсами тока. Так как нагрев катода осуществлялся в сильном магнитном поле, в качестве источника питания накала использовался ультразвуковой генератор типа УЗГ-4 мощностью до 5 кВт и рабочей частотой до 22 КГц, переделанный для работы в импульсном режиме. С целью обезгаживания катода предусматривался также независимый его подогрев постоянным током до температуры  $\leq 1000^\circ\text{C}$ . Температура катода, а, следовательно, и его эмиссионная способность определялась током постоянного прогрева и длительностью импульса ультразвукового генератора. Длительность импульса нагрева зависела от числа включенных проволок катода и режима работы и составляла  $5 + 20$  мсек. Отрицательный прямоугольный импульс вытягивающего напряжения регулируемой длительности и амплитуды подавался на катод через несколько микросекунд после окончания импульсного прогрева. Длительность фронтов вытягивающего импульса составляла несколько микросекунд. При измерении времени распада плазмы принимались специальные меры по уменьшению длитель-

ности заднего фронта. В этом случае длительность заднего фронта вытягивающего импульса составляла  $\sim 0,4$  мсек.

Плотность плазмы определялась с помощью тонкого цилиндрического зонда, расположенного в медианной плоскости ионизатора перпендикулярно магнитному полю и катодным проволокам. Зонд изготовлялся из вольфрамовой проволоки диаметром 24 мкм. Конструкция зонда позволяла производить его прокаливание до температуры свыше  $1000^\circ\text{C}$  для тренировки его поверхности в основном с целью уменьшения коэффициента вторичной ион-электронной эмиссии. Прокаливание зонда производилось перед каждой серией измерений. Плотность плазмы рассчитывалась по ионному току насыщения при отрицательном потенциале зонда, не менее чем на порядок превышающем температуру ионов, когда ток на зонд не зависит от температуры плазмы /9,10/

Плотность газа в районе ионизатора, измерялась стандартным преобразователем ПМИ-2 с удаленным стеклянным корпусом, расположенным вне сильного магнитного поля. Калибровка преобразователя производилась на основании экспериментов по измерению гажения проволок, описанных выше. Время распада плазмы измерялось по спаду ионного тока на зонд при быстром выключении вытягивающего напряжения и составляло в наших экспериментах  $3+5$  мсек.

Результаты измерения хода накопления плазмы в различных режимах работы модели ионизатора представлены на рис. 10. Давление газа в ионизаторе во время его работы увеличивалось до  $\sim 1 \cdot 10^{-4}$  тор. Непрерывный рост во времени плотности плазмы (при наличии на катоде вытягивающего напряжения) указывает на существование механизма эффективной ионизации молекул газа в ионизаторе электронами плазмы. Для простоты рассмотрим случай без преобразования потока электронов на конверторе при  $U_{\text{конв}} = +210$  в (кривая б на рис. 10). Если  $n_0 \langle \sigma_e v_e \rangle \tau_{ж} < 1$ , то есть вклад электронов плазмы в ионизацию газа мал, то за время в несколько времен жизни ионов в ней установится стационарный уровень плотности, равный

$$\bar{n}_i = \frac{n_0 \sigma_1 \tau_{ж}}{e} \bar{j}_1$$

При  $\bar{j}_i = 50 \text{ мА/см}^2$   $\bar{n}_i \approx 5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$   
 Здесь за время жизни иона мы приняли время распада плазмы при выключении вытягивающего напряжения. С включенным конвертором ( $U_{\text{конв}} < 0$ ) см. рис. 10, г) при  $n_0 < \beta_e V_e > \tau_{\text{ж}} < 1$  также должен существовать стационарный уровень плотности плазмы, точную величину которого рассчитать нельзя из-за отсутствия информации о числе осцилляций вторичных электронов (для двух пролетов  $n_i \approx 2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ ). Однако время выхода плотности ионов на этот постоянный уровень должно быть того же порядка, что и для случая  $U_{\text{конв}} > 0$ , то есть  $\sim 10$  мксек. Поскольку выхода на стационарный уровень по плотности плазмы мы не наблюдали, а измеренная плотность плазмы для случая  $U_{\text{конв}} > 0$  значительно превосходит расчетную, следует предположить, что в модели ионизатора реализуется условие  $n_0 < \beta_e V_e > \times \tau_{\text{ж}} > 1$ , отвечающее за режим саморазмножения плазмы. Необходимую для реализации этого условия энергию  $\sim 30$  эВ. электроны плазмы могут набрать как на полях пространственного заряда, которые особенно сильны в начале процесса из-за существования нескомпенсированных, пространственно разделенных потоков электронов, так и на флуктуациях заряда в плазме, наличие которых подтверждается высокочастотными (в районе плазменной частоты) составляющими тока на зонд. Нелинейный характер зависимости плотности плазмы от тока эмиссии электронов с термокатода (см. рис. II) можно объяснить двумя причинами. Во-первых, с ростом тока эмиссии увеличивается гашение ионизатора. Во-вторых, при большем токе эмиссии возрастает относительная величина высокочастотных сигналов на зонд, то есть разогрев электронов плазмы происходит, по-видимому, более интенсивно. Предварительный прогрев катода постоянным током уменьшает гашение катода, что приводит к уменьшению плотности газа в модели ионизатора. Соответственно снижается и плотность плазмы (см. рис. 10, в, II б).

Плазма в ионизаторе в целом была спокойной. Высокочастотные составляющие сигналов с зонда и конвертора носили шумовой характер и по величине составляли  $\sim 10 \pm 20\%$  полной амплитуды тока.

Измерение распределения плотности плазмы в направлении,

перпендикулярном катодным проволокам, производилось в секциях ионизаторов установленных в вакуумных камерах накопителя. На рисунках 12 а, б представлено распределение плотности плазмы по радиусу через 300 мксек после начала вытягивающего импульса в ионизаторах установленных в камерах поворотного магнита. Измерения производились подвижным зондом, ось которого располагалась параллельно катодным проволокам.

Как видно из рисунка 12, наличие магнитного поля существенно увеличивает среднюю плотность плазмы в ионизаторах. Из этих измерений следует также, что для создания плазмы со средней плотностью  $\sim 1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$  в каждой секции ионизатора достаточно включать 2-3 катодных проволоки. Однако для создания более равномерного распределения плотности плазмы в поворотном магните и учитывая неравномерность эмиссионных свойств катодных проволок, расстояние между проволоками должно быть, по-видимому, не более 10 мм.

#### Конструктивные особенности и питание ионизаторов в накопителе

Трудности в конструировании секций ионизаторов для накопителя определялись; в основном, отсутствием места в вакуумных камерах поворотных магнитов. На основании экспериментов с моделями была выбрана конструкция, изображенная на рисунке 14. Параллельно орбите протонного пучка с шагом 7 мм натягивались шесть катодных проволок I из торированного вольфрама диаметром 0,19 мм. Ввиду криволинейности орбиты в поворотном магните, через каждые 4 см устанавливались секции проходных изоляторов 2 из электрофарфора, сквозь которые пропускались проволоки катода. На расстоянии  $\sim 1$  мм располагались проволоки вытягивающей сетки 3 диаметром 0,2 мм - по две на каждую проволоку катода. Расстояние между проволоками сетки в паре - 2 мм. Параллельность проволок сетки катодным проволокам обеспечивалась креплением к секциям проходных изоляторов. В целях экономии места и упрощения конструкции отражающие пластины не устанавливались. Их роль выполнял слой слюды 4.

закрепленный на корпусе катодной части ионизатора. Для компенсации теплового удлинения проволоки катодов закреплялись на концах через предварительно натянутые вольфрамовые пружины 5, которые одновременно являлись и токоподводами. Со стороны протонного пучка пружины закрывались заземленными металлическими экранами 6. Все проволоки катода в секции соединялись последовательно через площадки крепления 7. Каждая площадка имела вывод из камеры через вакуумный разъем. Конверторная часть ионизатора конструктивно значительно проще. Медная пластина 8, являющаяся эмиттером вторичных электронов, закреплена на изоляторе 9. На расстоянии 0,7 мм от эмиттера расположена сетка из молибденовой проволоки диаметром 30 мкм с размером ячейки 150 x 150 мкм. Прозрачность сетки - 70%. Полная длина секции ионизатора - 30 см. Длина рабочей части 23 см. При постановке ионизаторов вертикальная геометрическая апертура вакуумных камер поворотного магнита уменьшилась на 25%.

Ионизаторы устанавливались по два в камеры всех поворотных магнитов и в первый и второй прямолинейные промежутки. В третьем промежутке из-за отсутствия места были установлены ионизаторы половинной длины. Четвертый прямолинейный промежуток накопителя занят бетатронным сердечником. Всего в накопителе было размещено 14 секций ионизаторов, суммарная рабочая длина которых составляла около половины длины дорожки накопителя. Для уменьшения влияния вытягивающего электрического поля на протонный пучок в каждом последующем ионизаторе катодная и конверторная часть менялись местами.

По количеству источников питания все ионизаторы были разделены на четыре группы, работающие в приблизительно равных условиях. В каждой группе ионизаторы по накалу включались последовательно. В качестве источников тока накала катодов были применены ультразвуковые генераторы УЗГ2-4. К каждой группе ионизаторов подключался генератор прямоугольных импульсов вытягивающего напряжения регулируемой амплитуды и длительности. Конвертор каждого ионизатора мог запитываться индивидуально, от одного из восьми источников. В рабочем режиме конверторы включались на два параллельно. Ток эмиссии группы ионизаторов

измерялся по току генератора вытягивающего напряжения. Во время настройки ток эмиссии каждого ионизатора измерялся по току электронов на конвертор при подаче на него положительного напряжения. Регулировка тока эмиссии осуществлялась путем изменения длительности импульса накала. Вся система ионизаторов управлялась ЭВМ типа Одра 1325, в функции которой входили контроль катодов, измерение, регулировка и поддержание на заданном уровне тока эмиссии. Информация о работе ионизаторов в цифровом виде отображалась на экране дисплея. Блок-схема питания ионизатора представлена на рис. 15.

#### Эксперименты по накоплению протонов в присутствии плазмы, создаваемой на дорожке накопителя ионизаторами остаточного газа

После установки всех секций ионизаторов в вакуумные камеры накопителя было проверено влияние вытягивающего напряжения на циркулирующий протонный пучок без включения накала катодов. На предельном вакууме на дорожке  $\bar{p} \approx 1 \cdot 10^{-5}$  тор включение вытягивающего напряжения было аналогично действию очищающих электродов /4,5/ при подаче на них небольшого потенциала. С повышением плотности газа в накопителе этот эффект уменьшался и при среднем давлении газа на дорожке накопителя выше  $7 \cdot 10^{-5}$  тор включение вытягивающего напряжения не отражалось на протонном пучке. Сдвига бетатронных частот протонов обнаружено не было.

Поведение протонного пучка в зависимости от плотности плазмы, создаваемой в ионизаторах представлено на рисунке 16. Качественно эти кривые аналогичны полученным нами ранее при изучении стабилизации двухпучковой неустойчивости плазмой, образующейся на дорожке накопителя в результате взаимодействия протонного пучка с нейтральным газом /6/. При малой плотности плазмы инкремент неустойчивости растет, накопленный ток протонов падает. При плотности плазмы большей  $3 \div 5 \cdot 10^8$  см<sup>-3</sup> двухпучковая неустойчивость стабилизируется и накопленный ток определяется временем жизни протонов на орбите.

Однако имеются и существенные различия. В случае создания плазмы на дорожке протонным пучком имеется четко выраженный порог по плотности газа в накопителе /6/, связанный с переходом в режим саморазмножения плазмы(I). Отсутствие такого порога в последних экспериментах подтверждает, что решающую роль в создании условий для подавления неустойчивости играет плазма в ионизаторах. К тому же стабилизация колебаний протонного пучка начинается при давлении газа на дорожке в  $1,5 \pm 2$  раза ниже порогового, равного для азота  $3,2 \cdot 10^{-4}$  тор.

В заключение автор выражает глубокую благодарность Димову Г.И. за постановку работы и полезные обсуждения, Журавлеву П.А. за помощь в конструировании и изготовлении ионизаторов, Лысянскому П.Б. за программное обеспечение эксперимента.

#### Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Димов, В.Г.Дудников, А.А.Соколов, В.Г.Шамовский  
Атомная энергия, 27, 130 (1969).
2. Г.И.Димов, В.Г.Дудников, В.Г.Шамовский.  
Атомная энергия, 29, 356 (1970).
3. Г.И.Димов, В.Г.Дудников, В.Г.Шамовский.  
Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц,  
Москва, 1968, 2, 285 (1970).
4. Г.И.Димов, В.Г.Шамовский, В.Е.Чуприянов. ЖТФ, 41, 2098,  
(1971).
5. Г.И.Димов, В.Г.Шамовский, В.Е.Чуприянов. Всесоюзное со-  
вещание по ускорителям заряженных частиц, Москва, 1972,  
1, 349 (1973 г.).
6. Ю.И.Бельченко, Г.И.Будкер, Г.Е.Деревянкин, Г.И.Димов,  
В.Г.Дудников, Г.В.Росляков, В.Е.Чуприянов, В.Г.Шамовский  
Труды X международной конференции по ускорителям заря-  
женных частиц высоких энергий. Протвино 1977, 1, 287  
Серпухов 1977.
7. Б.В.Чириков. Атомная энергия, 19,239, (1965).
8. Я. Грошковский. Техника высокого вакуума. М. Мир. 1975г.
9. Г.И.Будкер, В.В.Данилов, Э.П.Кругляков, Д.Д.Рютов,  
Е.В.Шунько. Эксперименты по удержанию плазмы в многопро-  
бочной ловушке.
10. О.В.Козлов. Электрический зонд в плазме. М. Атомиздат,  
1969.

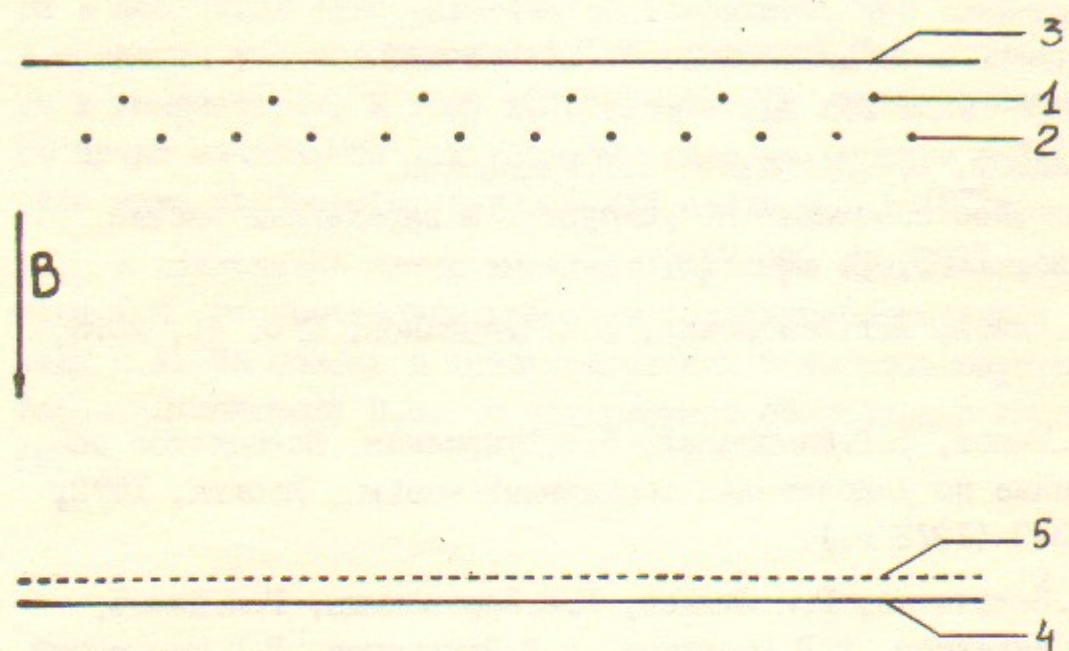


Рис. 1. Принципиальная схема ионизатора остаточного газа.  
 1 - проволока термокатода; 2 - проволока вытягивающей сетки; 3 - отражательная пластина; 4 - вторично-эмиссионная пластина конвертора; 5 - сетка конвертора.

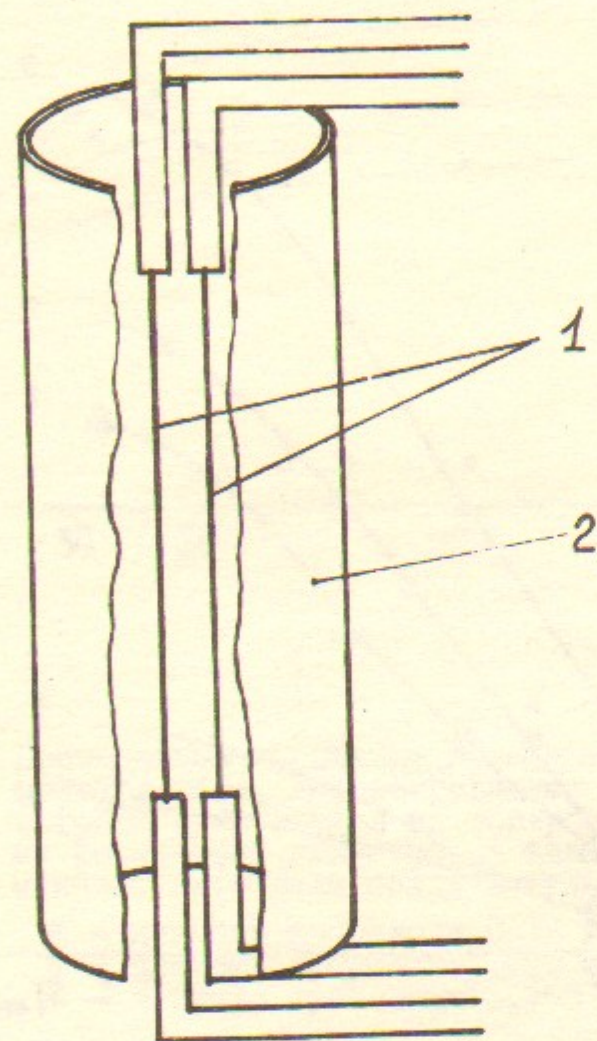


Рис. 2. Схема устройства для изучения газовой детализации ионизатора.  
 1 - накаливаемая проволока; 2 - экран.

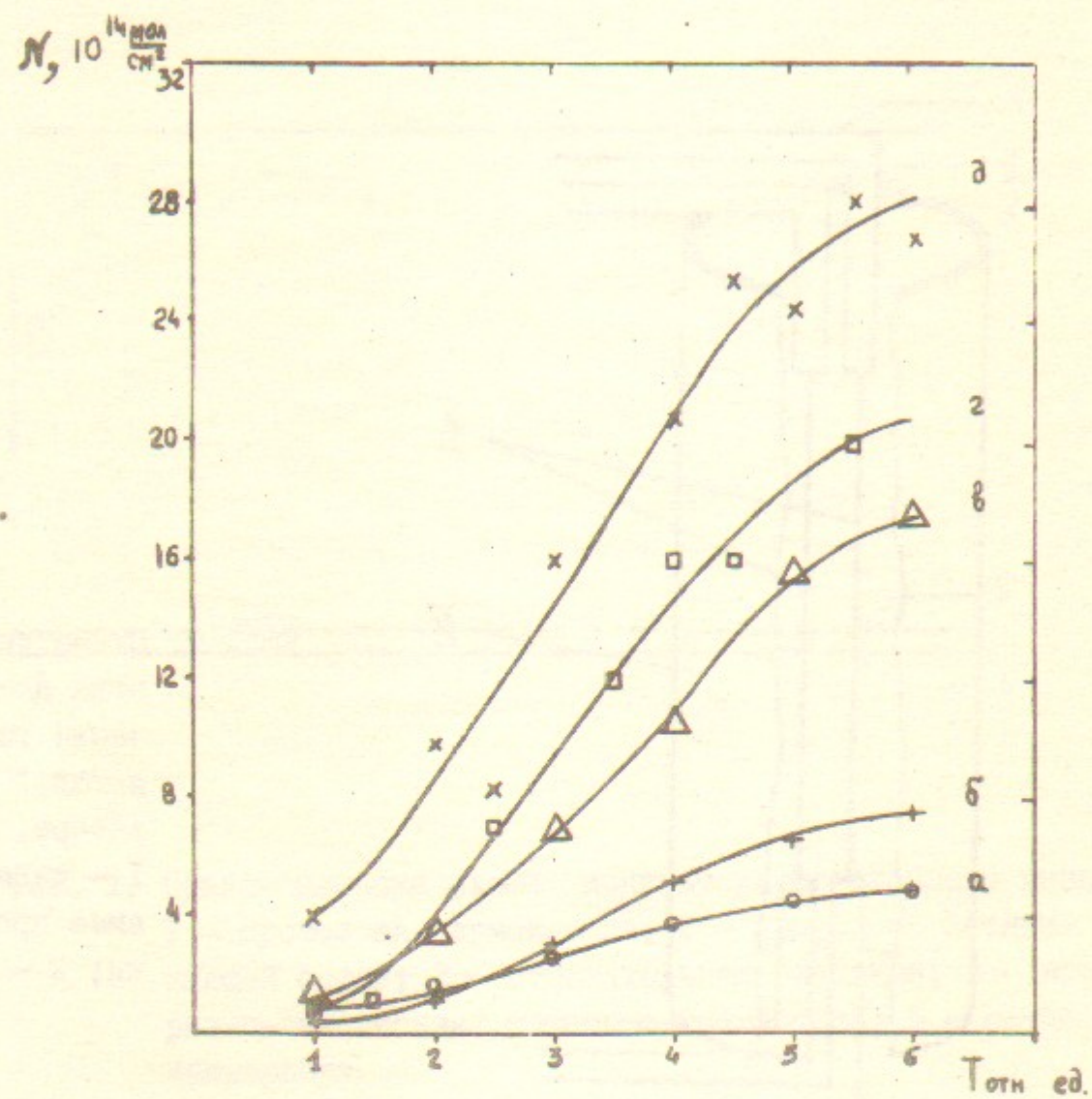


Рис. 3. Приведенное к единице поверхности количество молекул газа, десорбированных проволоками за импульс, в зависимости от конечной температуры проволоки при импульсном разогреве. Частота повторения импульсов 0,1 Гц. а, б — проволока диаметром 0,25 мм из молибдена; в — проволока диаметром 0,12 мм из торированного вольфрама; г — проволока диаметром 0,19 мм из торированного вольфрама; д — проволока диаметром 0,265 мм из торированного вольфрама; а, в, г, д — с постоянным обезгаживанием экрана за счет фотодесорбции при накале второй проволоки; б — без обезгаживания экрана.

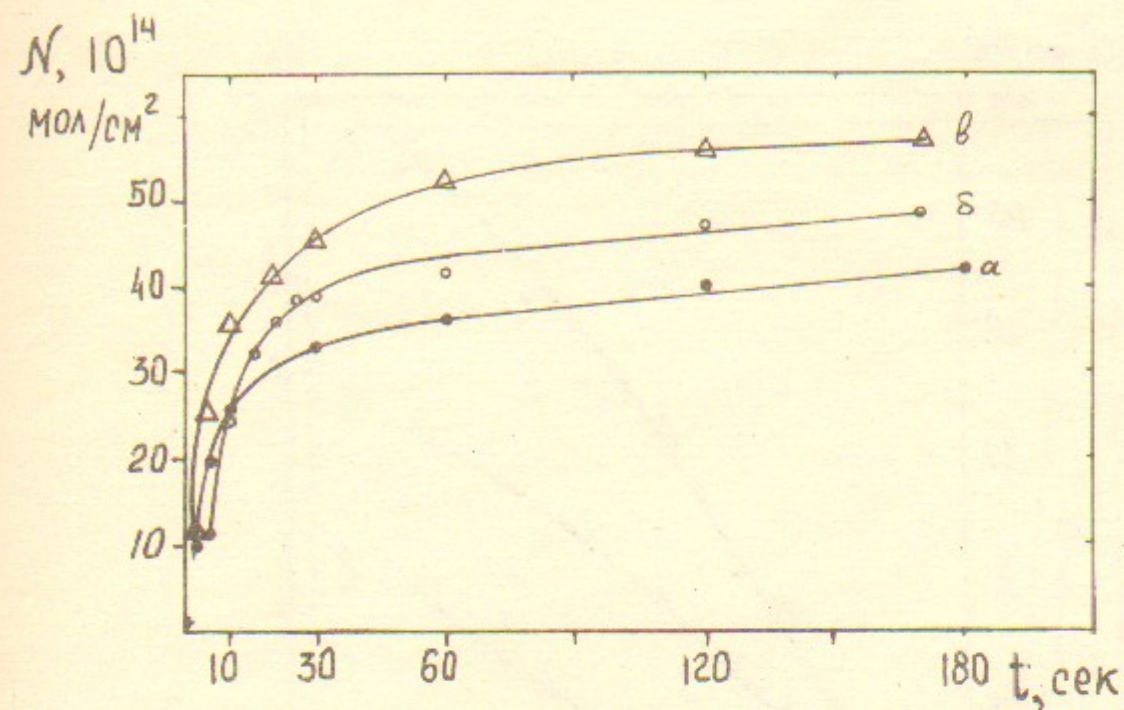


Рис. 4. Приведенное к единице поверхности количество молекул газа, десорбированных за импульс разогрева проволоками из торированного вольфрама различного диаметра, в зависимости от временного интервала между импульсами.

- а — диаметр проволоки 0,12 мм;
- б — диаметр проволоки 0,19 мм;
- в — диаметр проволоки 0,265 мм.

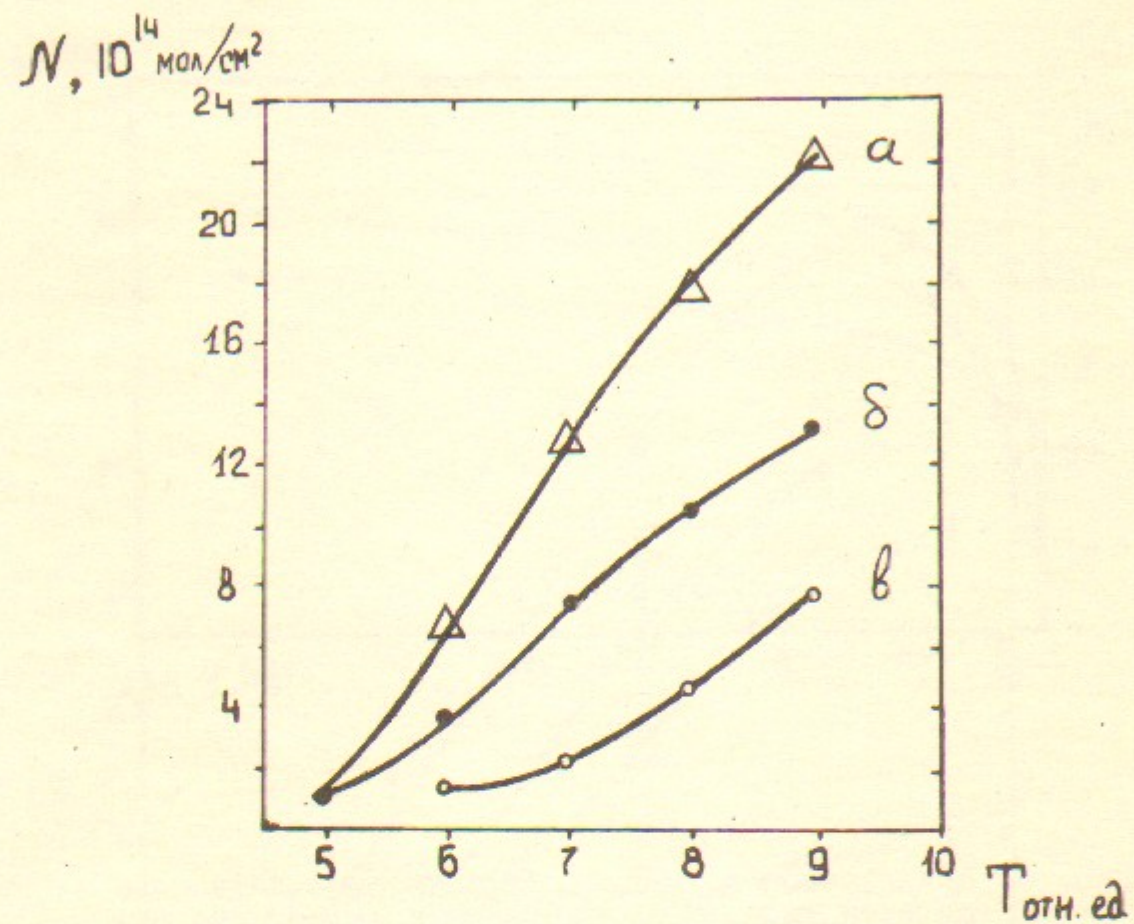


Рис. 5. Количество молекул газа, десорбированных за импульс проволокой из торированного вольфрама диаметром 0,19 мм, в зависимости от конечной температуры при импульсном нагреве и постоянном обезгаживании токовым прогревом в расчете на единицу поверхности проволоки. Частота повторения импульсов 0,1 Гц.  
 $a$  - без прогрева;  $б$  - ток прогрева - 1 А  
 $в$  - ток прогрева 2 А.

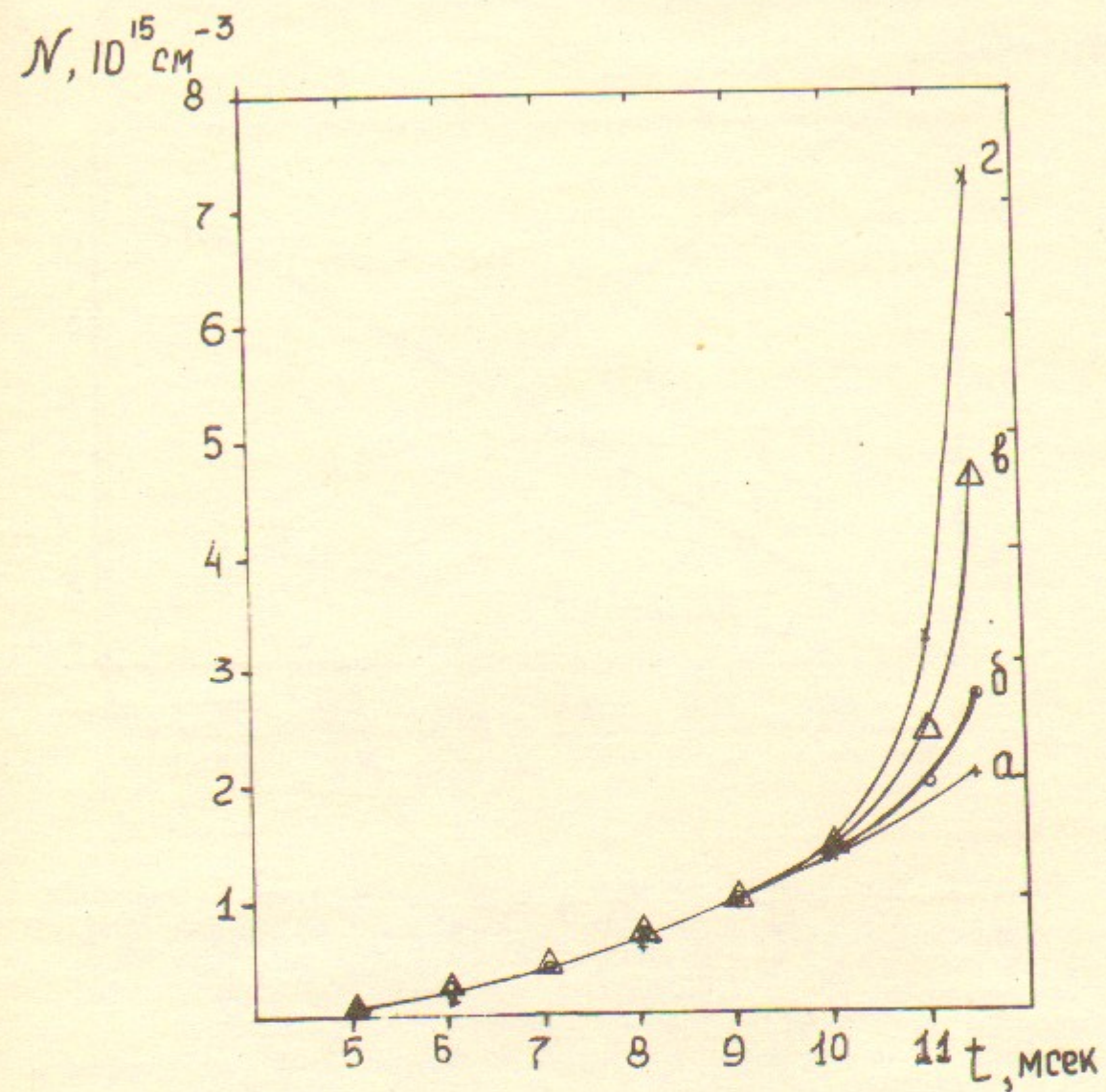


Рис. 6. Полное число молекул газа, десорбированных за импульс термокатодом из торированного вольфрама и экраном из молибдена, в зависимости от конечной температуры импульсного прогрева при различных длительностях вытягивающего импульса -  $\tau$ . Диаметр катода - 0,265 мм; длина - 50 мм. Частота повторения импульсов 0,1 Гц.  
 $a$  -  $\tau = 0$ ;  $б$  -  $\tau = 100$  мсек;  
 $в$  -  $\tau = 300$  мсек;  $г$  -  $\tau = 600$  мсек.  
 $t$  - длительность импульса тока прогрева.

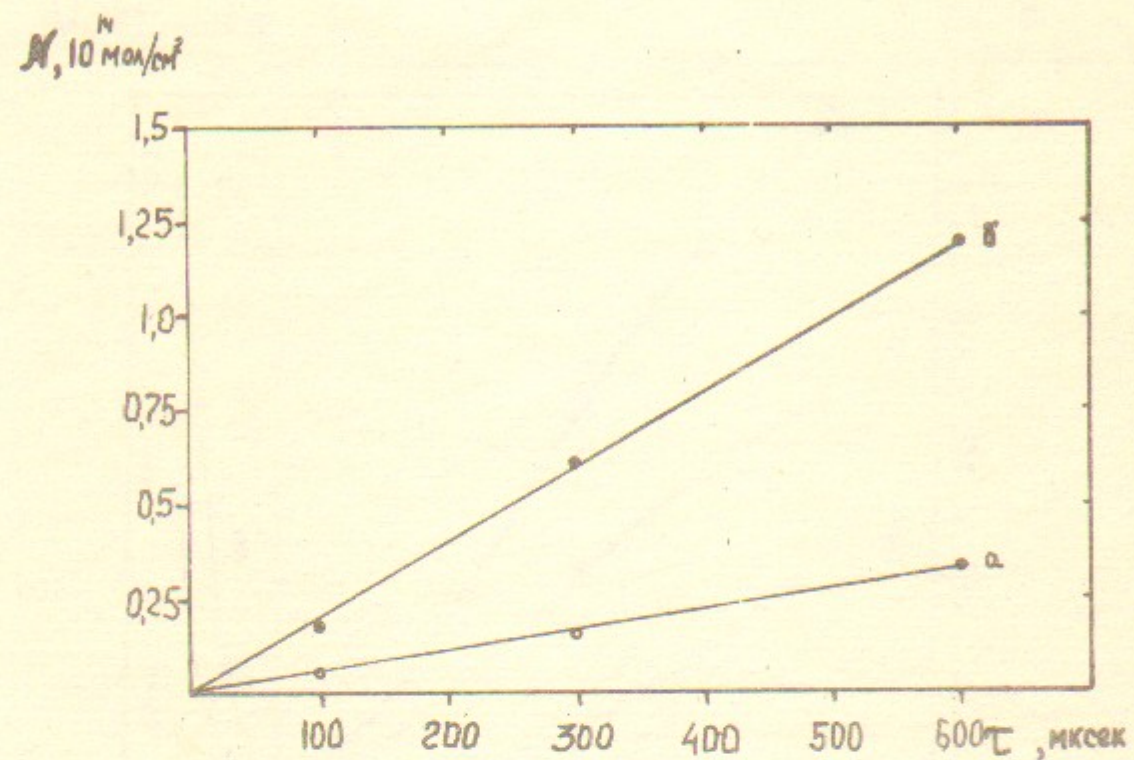


Рис. 7. Число молекул газа, десорбированных за импульс единицей поверхности экрана из молибдена под воздействием облучения электронами, в зависимости от длительности вытягивающего импульса. Частота следования импульсов 0,1 Гц.  
 а — ток электронов — 0,6 А; б — ток электронов — 3,7 А.

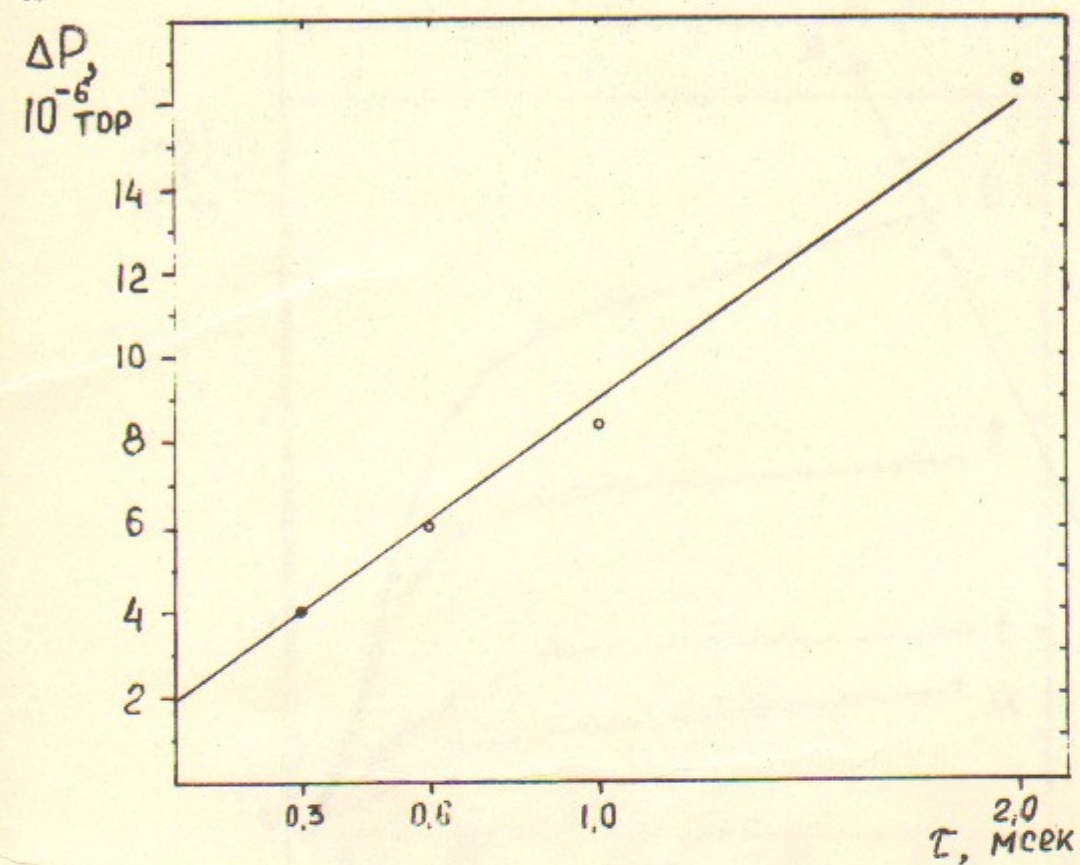


Рис. 8. Импульсное увеличение давления газа в прямолинейном промежутке накопителя при работе секции ионизатора в импульсном режиме накала термокатода в зависимости от длительности вытягивающего импульса. Число катодных проволок в работе — 2. Частота следования импульсов 0,1 Гц. Ток — эмиссии — 0,62А.



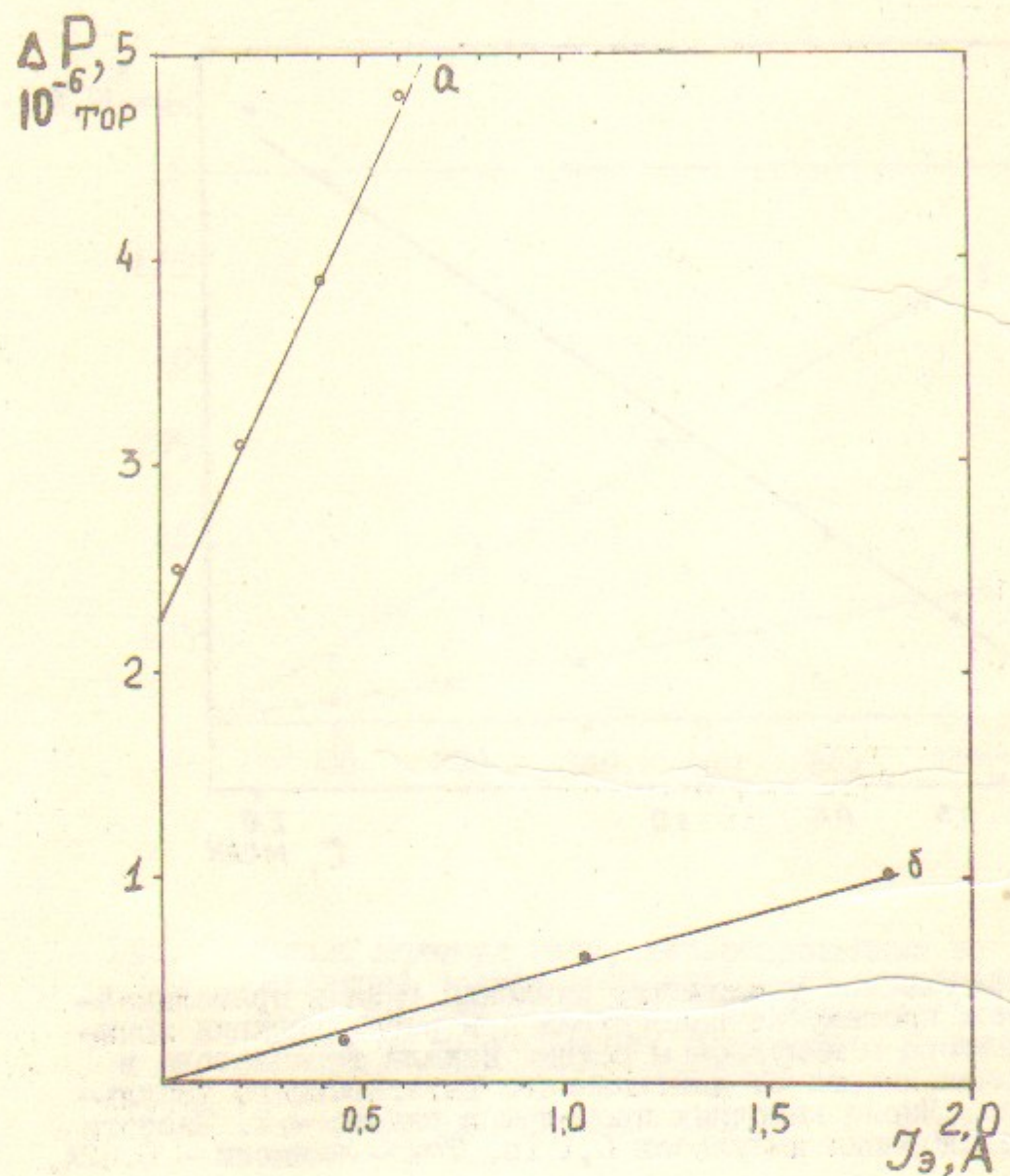


Рис. 9. Импульсное увеличение давления газа в прямолинейном промежутке накопителя при работе секции ионизатора в зависимости от тока эмиссии электронов. Число катодных проволок в работе - 2. Длительность вытягивающего импульса - 300 мксек. Частота следования импульсов - 0,1 Гц.

а - импульсный накал катодов;  
б - постоянный накал катодов.

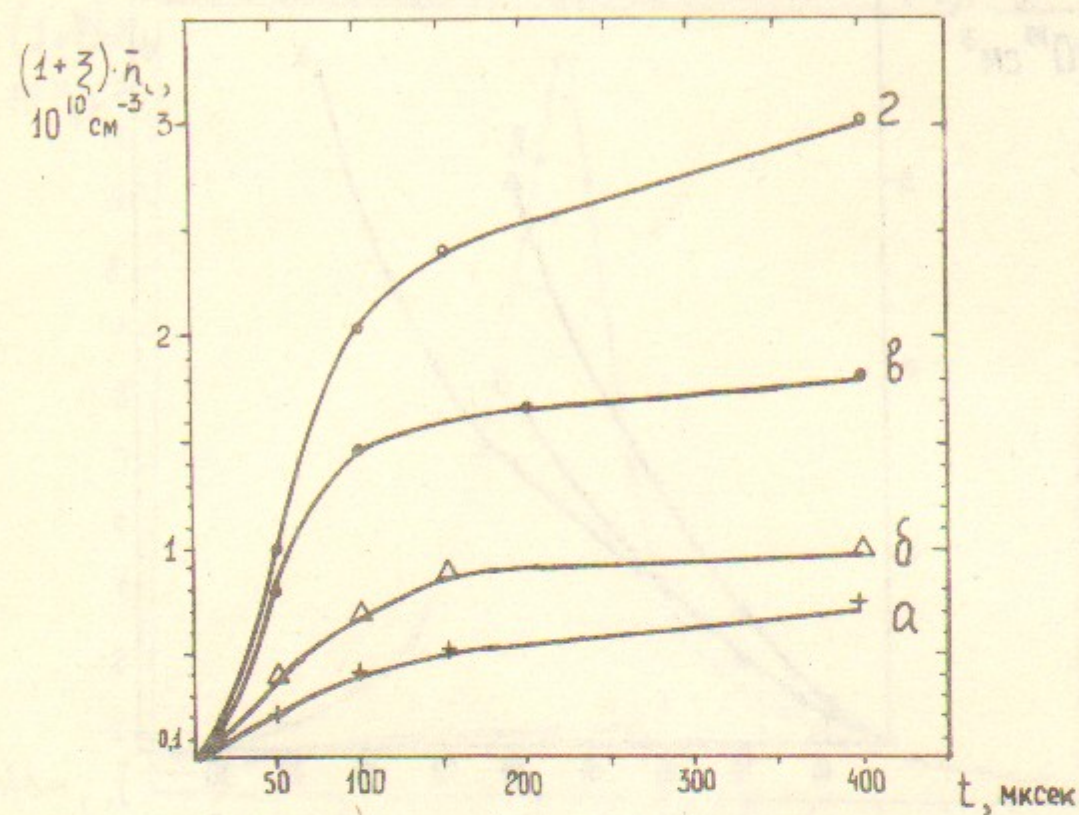


Рис. 10. Ход накопления плазмы в модели ионизатора в различных режимах работы.

а -  $\bar{J}_1 = 20 \text{ мА}$ ;  $U_{\text{конв}} = -120$  ;  
б -  $\bar{J}_1 = 50 \text{ мА}$ ;  $U_{\text{конв}} = +210$  ;  
в -  $\bar{J}_1 = 50 \text{ мА}$ ;  $U_{\text{конв}} = -120$  ;  
с постоянным прогревом катода током 1,5 А;  
г -  $\bar{J}_1 = 50 \text{ мА}$ ;  $U_{\text{конв}} = -120$   
 $0 < \xi < 1$  - фактор, зависящий от состояния поверхности зонда.

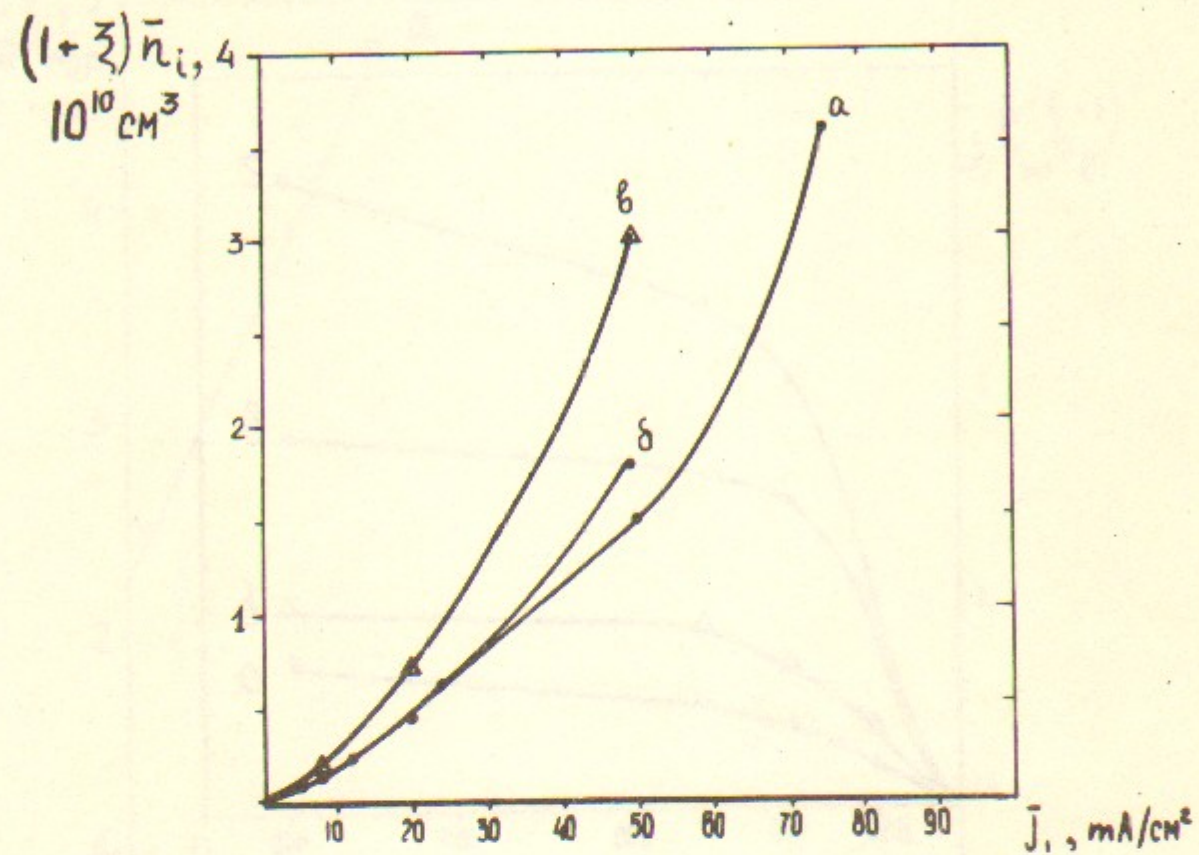


Рис. II. Зависимость средней плотности плазмы в модели ионизатора от средней плотности тока первичных электронов через 200 мксек (а) и 400 мксек (б, в) после начала вытягивающего импульса.  
а, в — без обезгаживания катода;  
б — с постоянным обезгаживанием катода прогревом током в 1,5 А.

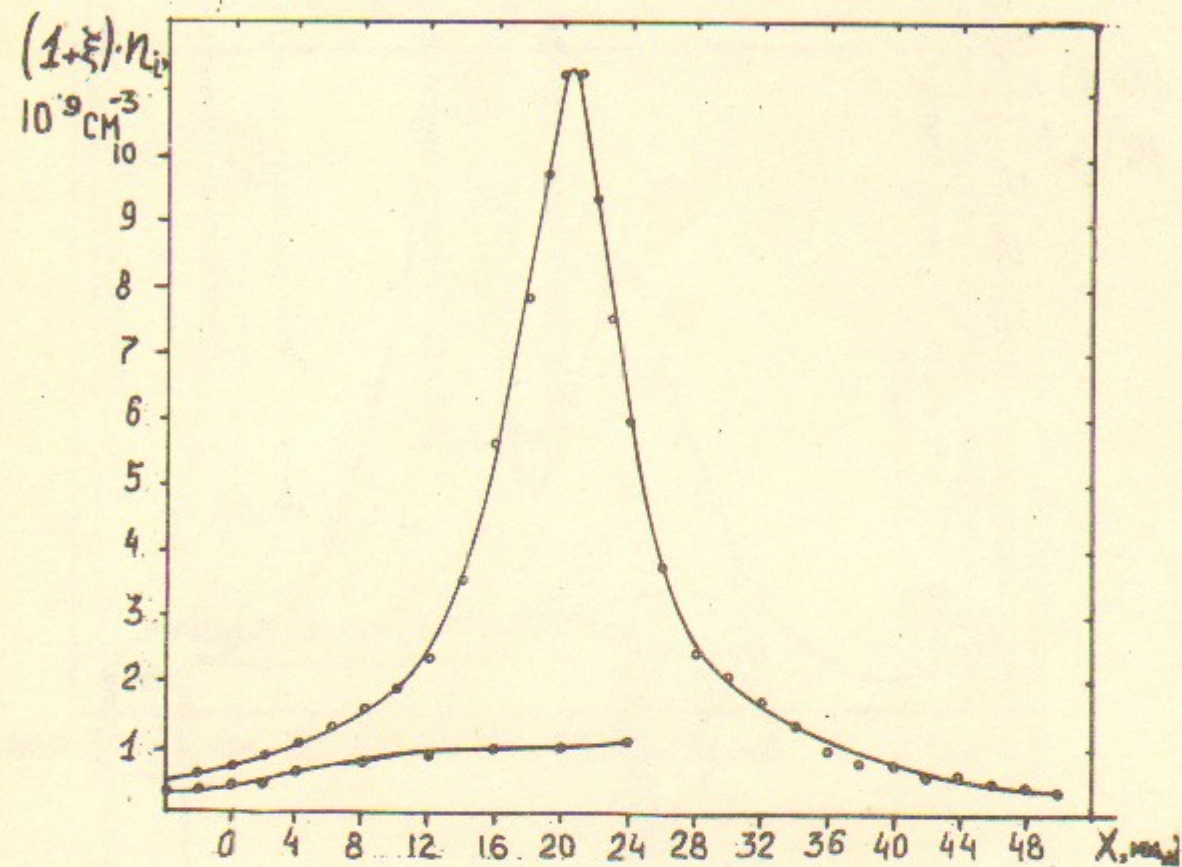


Рис. I2а. Распределение плотности плазмы по радиусу в секции ионизатора, установленной в камере поворотного магнита накопителя, измеренное через 300 мксек после начала вытягивающего импульса. Число катодных проволок в работе — I  
Ток эмиссии катода — 0,6 А.  
— в присутствии магнитного поля величиной 3,2 кГс  
---- без магнитного поля.

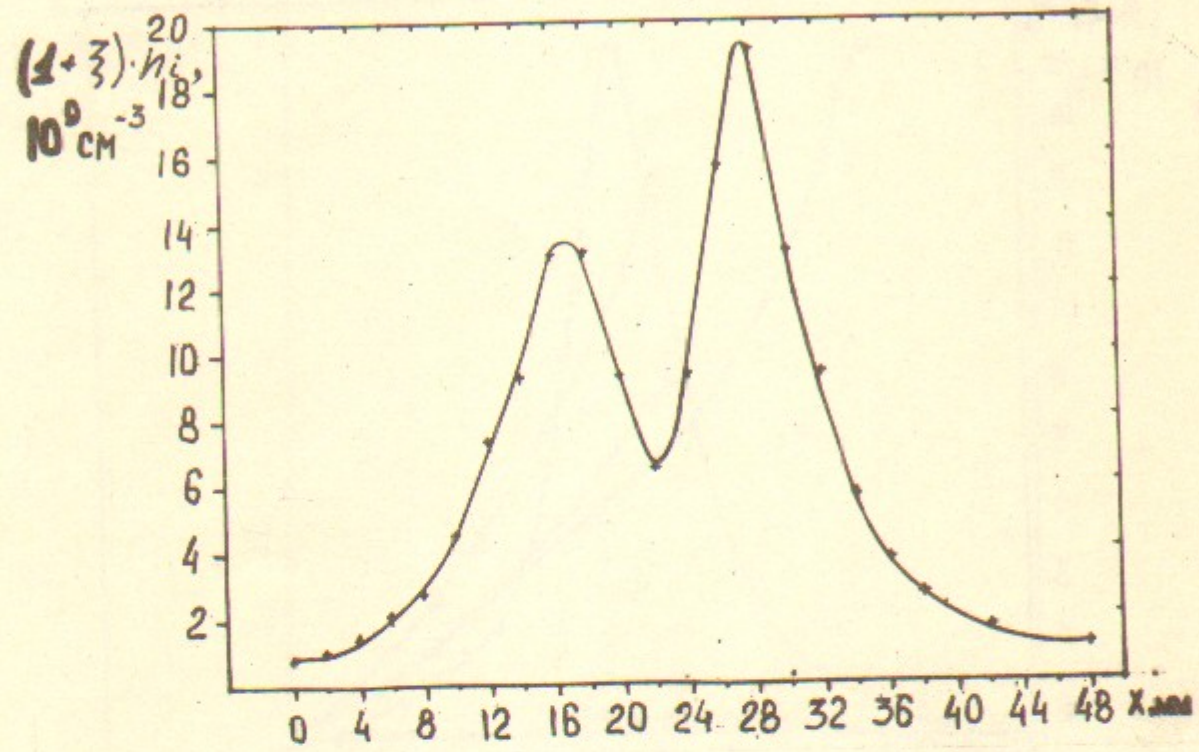


Рис. 126. Распределение плотности плазмы по радиусу в секции ионизатора, установленной в камере поворотного магнита накопителя, измеренное через 300 мксек после начала вытягивающего импульса в присутствии магнитного поля величиной 3,2 кГс. Число катодных проволок в работе 2. Суммарный ток эмиссии — 1,3 А.

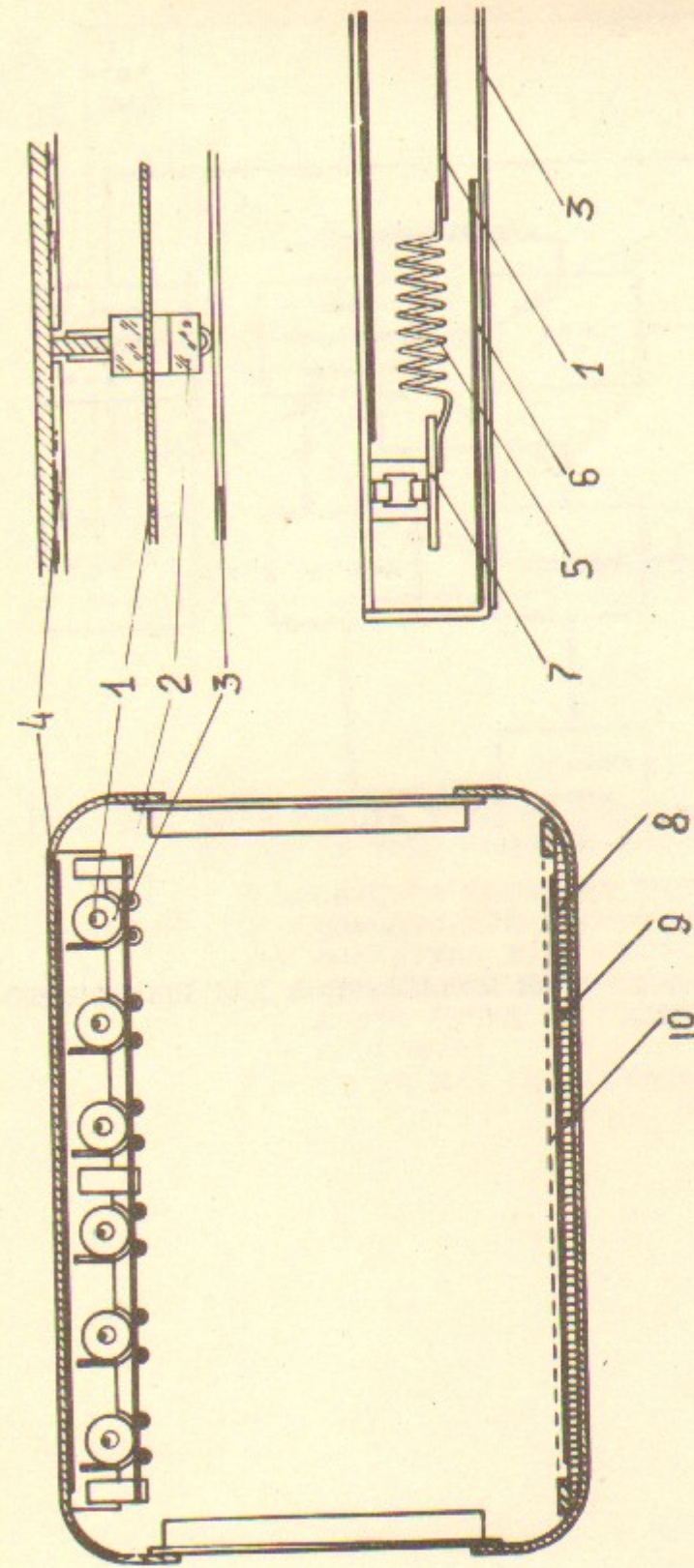


Рис. 13. Схема секции ионизатора для протонного накопителя. 1 — проволока термокатода; 2 — проходной изолятор; 3 — проволока первичной вытягивающей сетки; 4 — слой слюды; 5 — пружина; 6 — экран; 7 — площадка крепления термокатода; 8 — вторично-эмиссионная пластина конвертора; 9 — изолятор; 10 — вытягивающая сетка конвертора.

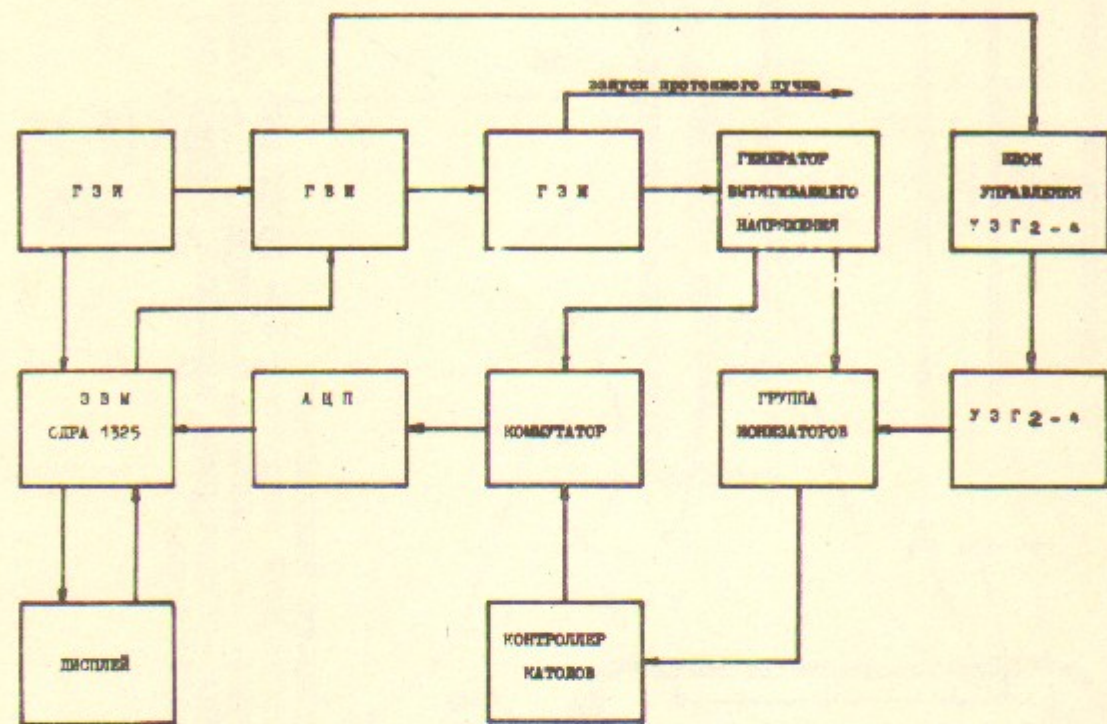


Рис. 14. Блок-схема питания ионизаторов для протонного накопителя.

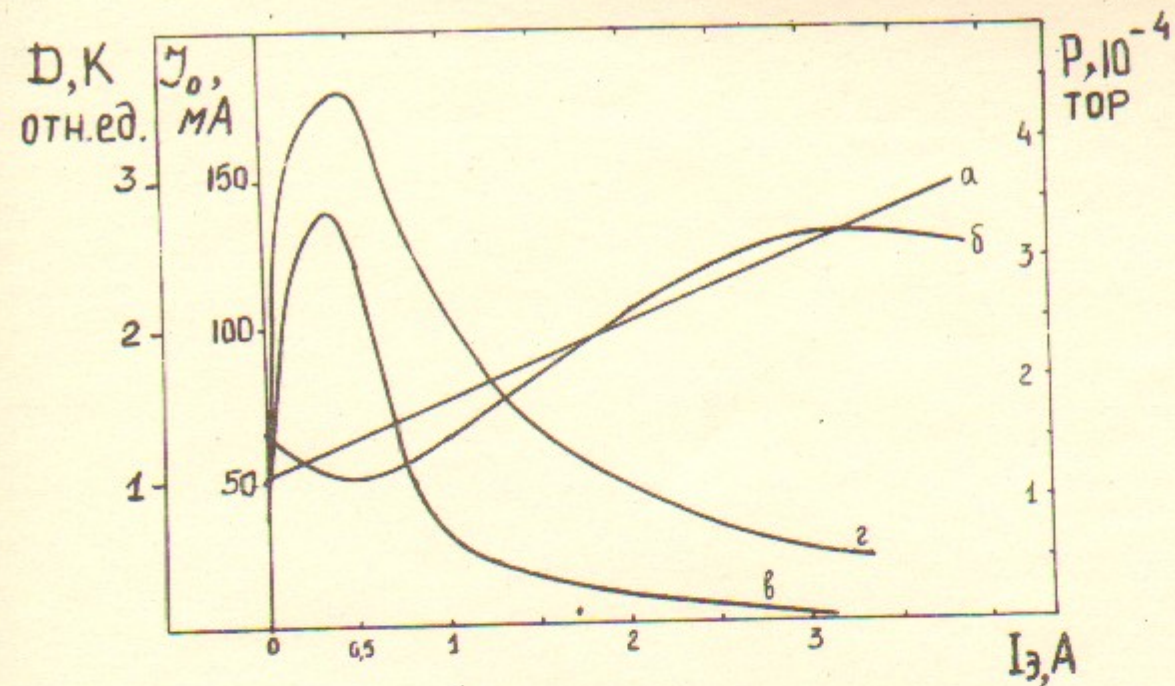


Рис. 15. Зависимость условий накопления протонного пучка от тока эмиссии в секциях ионизаторов.

- $\alpha$  - среднее давление газа на орбите;
- $\delta$  - накопленный протонный ток;
- $\beta$  - амплитуда в.ч. сигнала с электростатических электродов вертикального положения пучка на единицу орбитального тока протонов;
- $\gamma$  - то же для квадрупольных электродов.