

## ПОЛУЧЕНИЕ ПУЧКА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА С ЭНЕРГИЕЙ ДО 1,5 Мэв И ТОКОМ ДО 1 ма

Г. И. ДИМОВ, И. Я. ТИМОШИН, В. В. ДЕМИДОВ, В. Г. ДУДНИКОВ

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

(Получено 11 июля 1966 г.)

Получен импульсный пучок отрицательных ионов водорода с током до 1 ма длительностью до 1,5 мсек от электростатического ускорителя на 1,5 Мэв. Описаны источник Н<sup>-</sup> и система стабилизации энергии.

Пучок отрицательных ионов водорода с током в импульсе до 1 ма от электростатического ускорителя на 1,5 Мэв предназначен для инъекции протонов в накопительное кольцо перезарядным методом [1]. На ускорителе установлен источник ионов Н<sup>-</sup>, работающий в режиме одиночных импульсов длительностью до 1,5 мсек с внешним запуском. Ионы ускоряются за счет накапливаемой между импульсами энергии электростатического поля ускорителя. Падение напряжения на ускорительной трубке во время импульса ионного тока компенсируется при помощи электрода «лайнера», входящего в систему стабилизации энергии ионов. На рис. 1 дана схема этой стабилизации, осуществляемой по двум каналам.

По первому каналу с полосой пропускания от 0 до 0,5 гц стабилизируется постоянная составляющая напряжения на ус-

корителе, что позволяет уменьшить диапазон изменения напряжения лайнером. Усиленный сигнал ошибки с роторного вольтметра выпрямляется фазовым детектором, на выходе которого стоит фильтр с постоянной времени ~1 сек, и корректирует ток заряда ленты. Роторный вольтметр выполнен с компенсирующим электрическим полем, имеет дополнительную ротор-статорную пару, сигнал с которой поступает на фазовый детектор для определения знака сигнала ошибки. Для повышения чувствительности роторного вольтметра приняты меры по снижению минимального уровня сигнала ошибки: статорная пластина, с которой снимается сигнал ошибки, выполнена аналогично описанной в [2]; сетка, ослабляющая измеряемое поле, изготовлена из концентрических проволочных колец. Общий коэффициент передачи этого канала

стабилизации ограничивается условием устойчивости и при указанной временной характеристике равен 10. Наблюдаемое по роторному вольтметру изменение постоянной составляющей напряжения на ускорителе за время ~1 ч равнялось 0,05%. Наблюдавшиеся при помощи емкостного делителя колебания напряжения на ускорителе составляют ±0,15% на частоте вращения ленты (~5 гц), ±0,08% на частотах 50 гц ~1 гц.

Второй канал схемы стабилизации работает синхронно с импульсом ионного тока

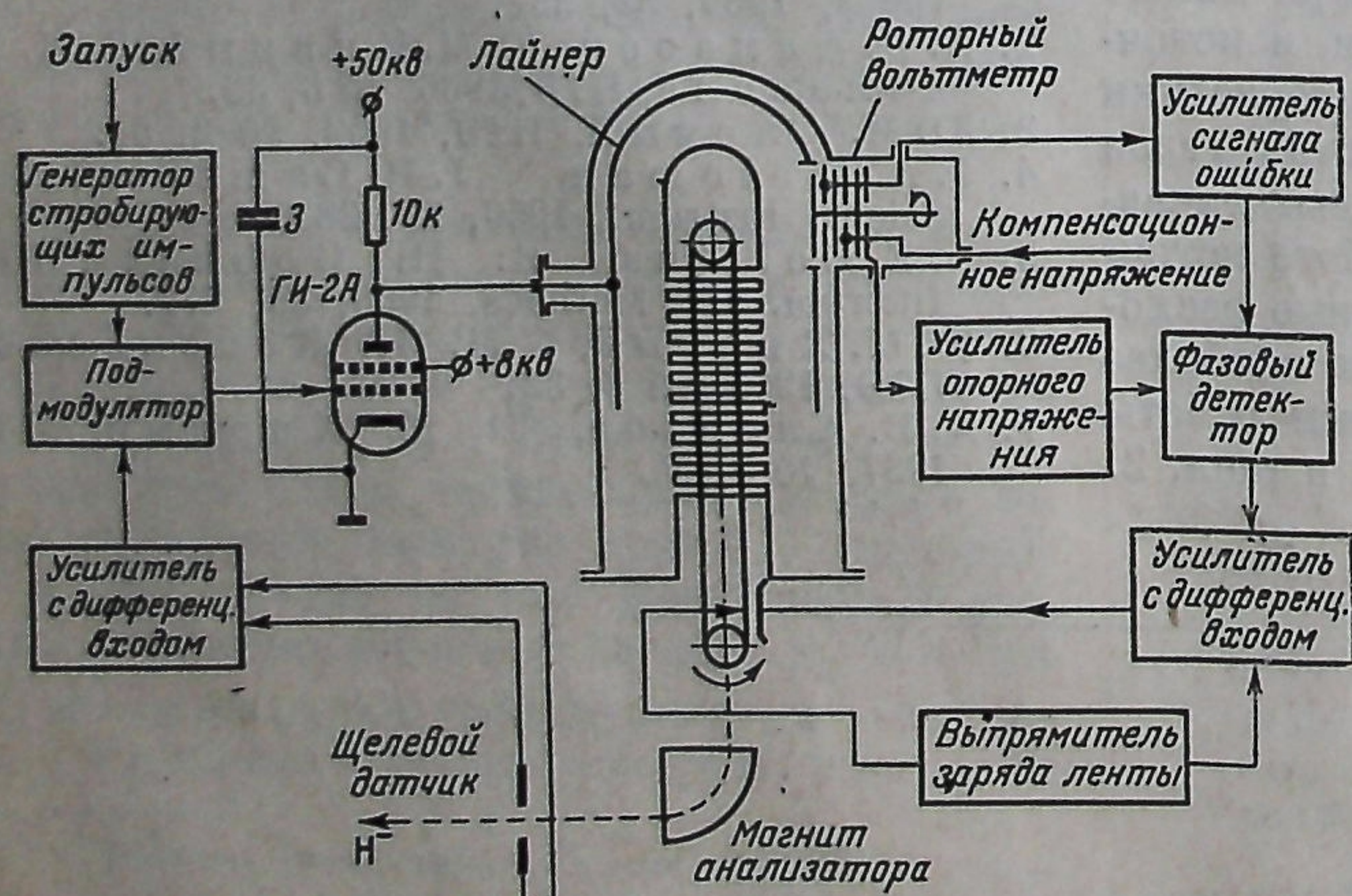


Рис. 1. Схема стабилизации э.с.у.

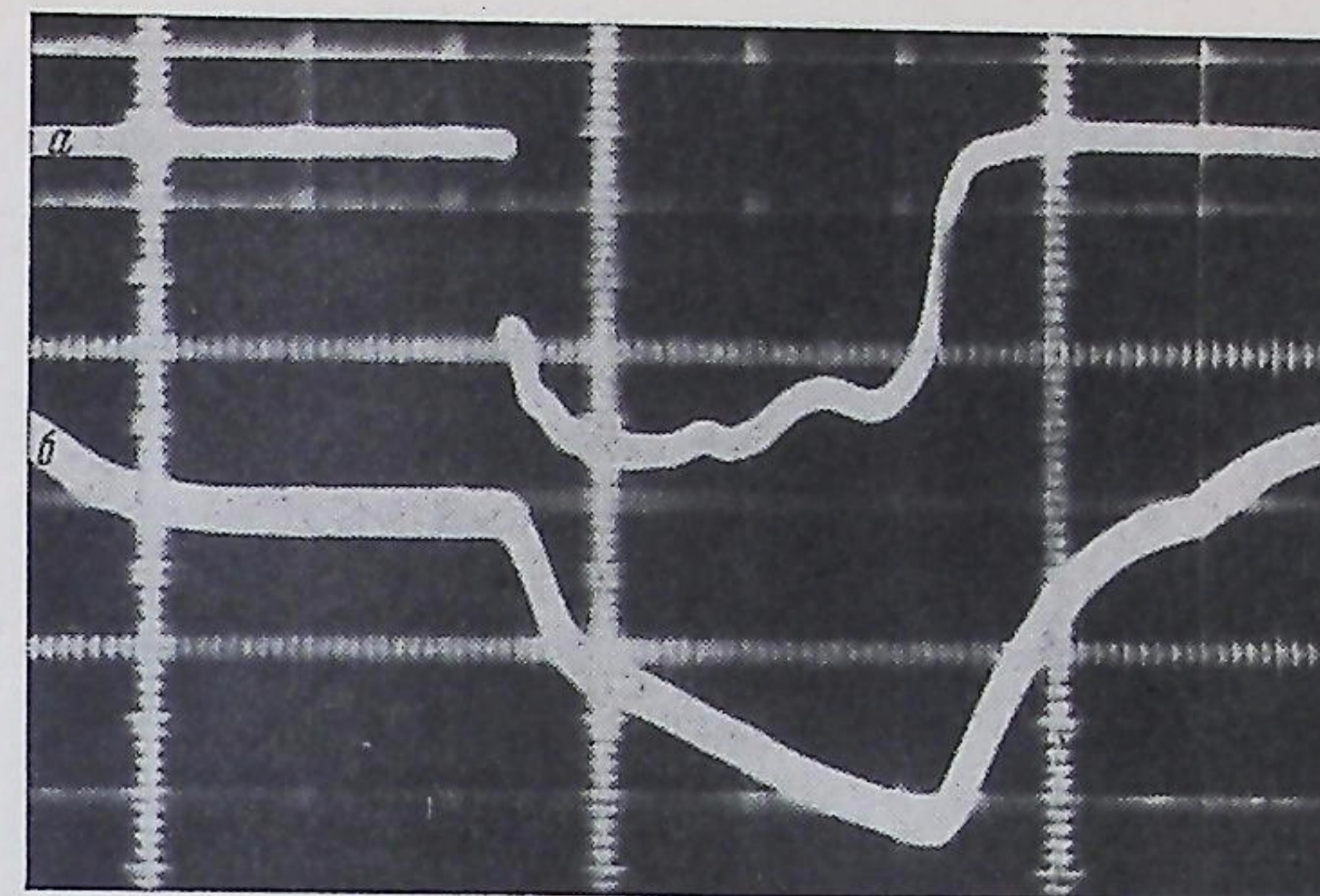


Рис. 2. Осциллограммы: б — напряжение на лайнере; а — ток ускоренных ионов

и имеет полосу пропускания от 20 гц до 200 кгц. Сигнал от щелевого датчика магнитного анализатора при прохождении ионного пучка управляет напряжением на лайнере, которое может изменяться от 10 до 50 кв. Коэффициент усиления этого тракта  $10^4 \div 10^5$  ограничивается условием устойчивости. За ~1 мсек до запуска ионного источника на промежуточный каскад усилительного тракта подается стробирующий импульс длительностью 2,5 мсек, который вводит на это время в рабочий режим выходную лампу тракта. Это позволяет значительно уменьшить среднюю мощность рассеяния на электродах выходной лампы. На рис. 2 дана осциллограмма напряжения на лайнере (б) совместно с осциллограммой ионного тока (а). Скачок напряжения на лайнере в начале импульса ионного тока связан с отклонением напряжения на ускорителе от необходимого в момент срабатывания источника. Величина этого скачка по наблюдениям в течение 1 ч изменяется на 6,5 кв при энергии 1 Мэв. За время импульса ионного тока длительностью 1 мсек амплитудой 1 ма напряжение на лайнере уменьшается на 10 кв в соответствии с расчетом (емкость между высоковольтным электродом и лайнером ~100 пф). Наблюдение за ионным пучком после поворота его магнитным анализатором на прямой угол показало, что нестабильность угла поворота не превышает  $10^{-3}$  рад. Нестабильность поля магнитного анализатора не более 0,01%. При неизменной геометрии пучка на входе в анализатор разброс энергии ионов составляет не более 0,1%.

Источник отрицательных ионов водорода по принципу работы аналогичен циклотронному источнику [3], имеет ряд особенностей в конструкции и режиме работы. Общий вид источника показан на рис. 3. Постоянный магнит 6, создающий магнитное поле напряженностью 1800 э, собран из брусков сплава АНКО-4; его стальные полюса сварены в камеру источника 12. Через центральные отверстия в полюсах с одной стороны вставляется термокатод 1, с другой — анод 13. Катод изготовлен из танталовой полосы толщиной 0,5 мм, имеет П-образную форму и привинчивается к медным токопроводам 2 стальными винтами. Верхняя рабочая часть катода имеет размеры  $4 \times 4$  мм<sup>2</sup> и удалена от токопроводов на 10 мм; концы катода имеют ширину 7 мм. Потребляемая катодом мощность ~180 вт. Токопроводы изолируются при помощи керамических трубок 4 и уплотняются на вакуум прокладками из силиконовой резины 5. Для охлаждения катодного ввода предусмотрены радиаторы 3. Анод изготовлен из немагнитной стали и имеет разрядный канал  $\phi 5$  мм. Зазор между катодом и анодом —  $2 \div 3$  мм. В разрядный канал анода через восемь продольных щелей  $10 \times 0,5$  мм<sup>2</sup> в его стенке производится импульсный напуск водорода. Водород поступает из бачка высокого давления (до 100 ат) через герметизированный понижающий редуктор к электромагнитному клапану 8, от которого по конической тонкостенной трубке 11 через обойму 14 подводится к аноду. Клапан вынесен из области сильного магнитного поля. Плохая теплопроводность трубки 11 и хороший тепловой контакт с корпусом источника посредством медной шины 9 исключают перегрев клапана.

В анодном канале вдоль магнитного поля зажигается дуга длительностью до 1,5 мсек. Поперечные размеры дуги ограничиваются вставкой с отверстием  $3 \times 3$  мм<sup>2</sup>, запрессованной в анод со стороны катода. Дуга является мощным источником электронов, которые при столкновениях с молекулами водорода с вероятностью  $10^{-5} \div 10^{-6}$  образуют ионы Н<sup>-</sup>. С этим процессом конкурирует развал Н<sup>-</sup> с вероятностью порядка единицы при соударениях с нейтральными и заряженными частицами. Через продольную щель  $20 \times 1$  мм<sup>2</sup>, вырезанную в стенке анода толщиной 1,5 мм, отрицательные ионы вытягиваются электродом 10, находящимся

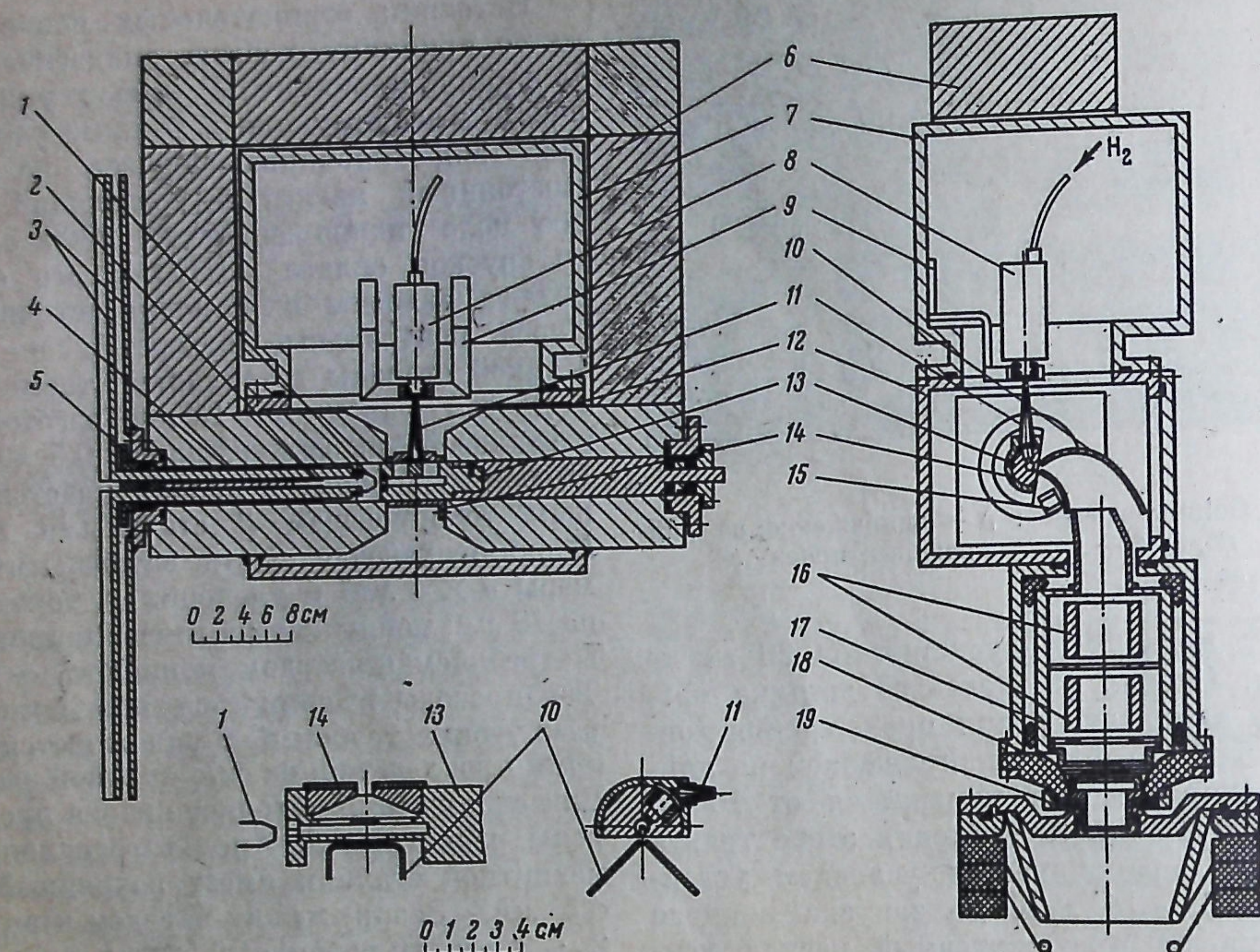


Рис. 3. Источник отрицательных ионов. 1 — термокатод, 2 — токоподводы, 3 — радиаторы, 4 — керамические изоляторы, 5 — резиновое уплотнение, 6 — постоянный магнит, 7 — вакуумная камера, 8 — электромагнитный клапан, 9 — теплоотвод, 10 — отсасывающий электрод, 11 — коническая трубка, 12 — камера источника, 13 — анод, 14 — обойма, 15 — улавливающая пластина, 16 — квадрупольные линзы, 17 — экран, 18 — резиновая мембрана

под потенциалом  $+4,8$  кВ. Вытягивающий электрод укреплен непосредственно на аноде при помощи изолирующей керамической пластины. Выход  $H^-$  зависит от величины и распределения плотности водорода и электронов, а также от температуры электронов. Распределение электронов поперек разрядного канала и их температура зависят от режима дугового разряда. Более благоприятные условия для выхода  $H^-$  создаются при несамостоятельном разряде с повышением падения напряжения на разрядном промежутке. С увеличением разрядного тока из-за сильного подогрева катода ионной бомбардировкой разряд начинает переходить в самостоятельную дугу с понижением катодного падения потенциала. Режим дугового разряда и плотность водорода необходимо подбирать оптимальными. В описываемом источнике оптимальный разрядный ток  $\sim 5$  А, напряжение на дуге  $200 \div 250$  В.

Оценка плотности водорода производилась по количеству газа, пропускаемому клапаном, и форме импульса потока водорода из выходной щели анода. Оптимальная плотность водорода в разрядном канале  $\sim 10^{16}$  молекул/см<sup>3</sup>; толщина водородного слоя между поверхностью дуги и отсасывающим электродом  $\sim 10^{15}$  молекул/см<sup>2</sup>; расход водорода за один импульс  $6 \cdot 10^{-3}$  см<sup>3</sup>. На рис. 4 даны осциллограммы импульсов потока водорода (а), тока дуги (б) и вытягиваемого тока отрицательных ионов (в). Объем вакуумной камеры источника увеличен до 10 л для уменьшения импульсной загрузки водородом ускорительной трубки. Время откачки этой камеры  $\sim 0,1$  сек. При проводимости ускорительной трубки  $\sim 500$  л водорода/сек давление в верхней ее части не превышает  $5 \cdot 10^{-5}$  тор в импульсе.

Вместе с отрицательными ионами из разряда вытягиваются электроны, которые дрей-

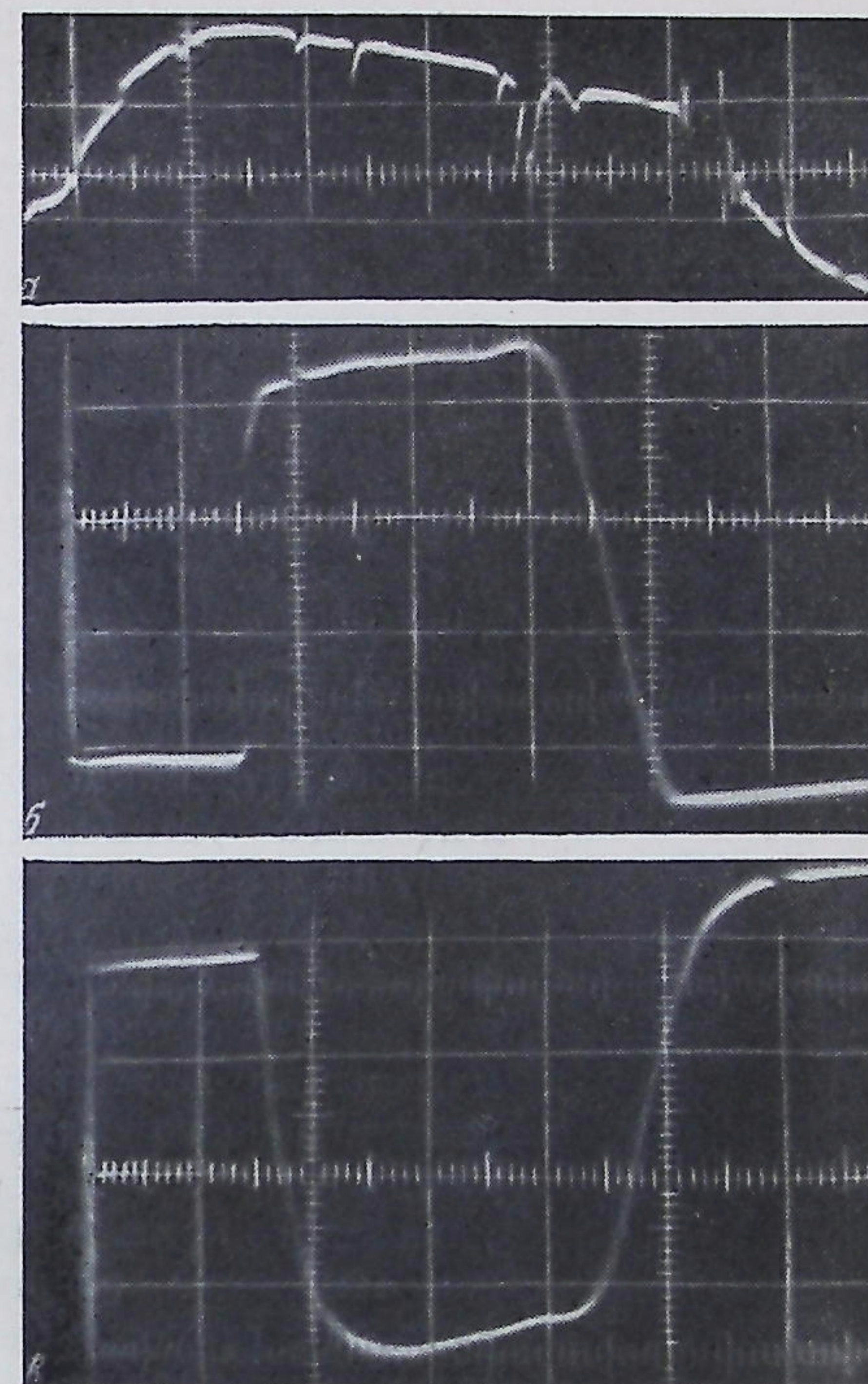


Рис. 4. Осциллограммы: а — поток водорода из источника, б — разрядный ток источника, в — ток  $H^-$  из источника

фуют по эквипотенциальным поверхностям перпендикулярно магнитному полю. Часть электронов диффундирует на вытягивающий электрод, часть достигает поверхности изолятора и разрушает его. Пластина 15, находящаяся под потенциалом  $+2,5$  кВ, установлена так, чтобы на пути дрейфа электронов создать электрическое поле параллельное магнитному. Электроны притягиваются к пластине, их поток на изолятор прекращается, ток электронов на вытягивающий электрод снижается с 100 до 20 мА, и вероятность пробоя с вытягивающего электрода уменьшается.

Ленточный пучок отрицательных ионов, ускоренных вытягивающим напряжением, поворачивается магнитным полем на угол  $\sim 70^\circ$  и фокусируется парой электростатических квадрупольных линз 16 в 15 см от входа в ускорительную трубку. Траектории ионов корректируются поворотом анода вместе с вытягива-

ющим электродом и изменением напряжения между противоположными полюсами первой квадрупольной линзы. В фокусе пучок фильтруется от вторичных электронов и дополнительно ускоряется до  $12 \div 15$  кэВ для электронно-оптического согласования с ускорительной трубкой. Квадрупольные линзы размещены в электростатическом и магнитном экране из железа армоко 17, находящемся под потенциалом вытягивающего электрода. Сочленение вакуумной камеры источника с ускорительной трубкой не жесткое, при помощи кольцевой резиновой мембраны 18. Рассеянное магнитное поле источника нарушает нормальную работу ускорительной трубки. При помощи экранов из железа армоко и пермаллоя оно было ослаблено до 5 э на входном конце трубки.

На рис. 5 представлена принципиальная схема питания и управления источником. Импульсное питание разрядного промежутка осуществляется через тиратрон. Постоянное вытягивающее напряжение стабилизировано. Ток накала катода, напряжения на линзах и дополнительно ускоряющее напряжение регулируются дистанционно. Синхронизация работы источника, находящегося под высоким потенциалом, осуществляется двумя импульсами света длительностью  $\sim 25$  мксек с задержкой второго относительно первого на  $0,5 \div 1,5$  мсек. Оба световых импульса поступают к источнику по общему световоду из оргстекла. В приемном устройстве производится разделение импульсов для запуска схемы питания электромагнитного клапана и генератора разрядного тока. Все элементы электрической схемы были испытаны в рабочих режимах в газе, сжатом до 22 ат.

Изучение структуры пучка отрицательных ионов на стенде при помощи пластинчатого коллектора показало, что пучок фокусируется в пятно с размерами  $4 \times 4$  мм<sup>2</sup>. Угловой раствор пучка после прохождения фокуса вдоль магнитного поля источника  $0,07$  рад, поперек магнитного поля —  $0,15$  рад. На выходе ускорителя в двух метрах от конца ускорительной трубки пучок фокусируется в пятно с поперечными размерами в 10 мм, что согласуется с расчетным увеличением трубки.

После выхода из ускорителя пучок  $H^-$  дополнительно фокусируется электростатической квадрупольной линзой примерно в центр магнитного анализатора. После выхода

### ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ГЕРМАНИЯ НА СТЕНДЕ И В ЦИКЛОТРОНЕ

А. С. ПАСЮК, Ю. П. ТРЕТЬЯКОВ

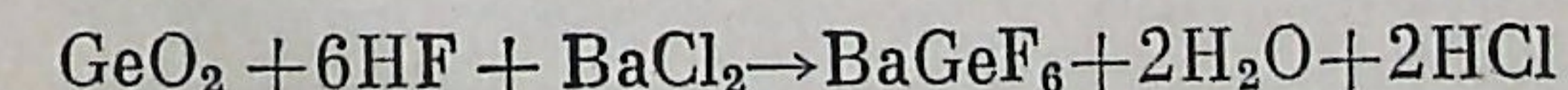
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

(Получено 9 августа 1966 г.)

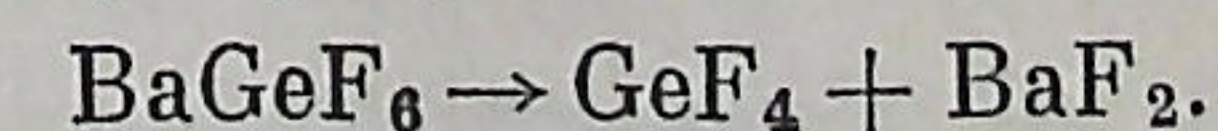
Предпринята попытка получить и ускорить на циклотроне многозарядные ионы германия из дугового источника многозарядных ионов с подогревным катодом. Средний ток ускоренных на 3-й гармонике ионов  $Ge_{70}^{8+}$  составил 1 мка.

Для синтеза далеких трансурановых элементов при использовании существующих в настоящее время тяжелых мишеней необходимы ускоренные до энергий 400 Мэв и выше ионы элементов с зарядом ядра  $Z \geq 30$ . Максимальная энергия иона, ускоренного в циклотроне, пропорциональна  $(Z_i HR)^2$ , где  $Z_i$  — заряд иона,  $H$  — напряженность магнитного поля,  $R$  — конечный радиус траектории иона в циклотроне. Чем больше заряд иона  $Z_i$ , тем меньше может быть произведение  $HR$  для получения необходимой энергии иона. Цель данной работы — выяснить, с каким наибольшим зарядом могут быть получены упомянутые ионы из ионного источника [1], применяемого на ускорителях Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Попытка получить многозарядные ионы германия ( $Z = 32$ ) была сделана в первую очередь потому, что при нормальных условиях существует газообразное соединение  $GeF_4$ , которое может быть подано в газоразрядный ионный источник.

В качестве исходного продукта для получения четырехфтористого германия была взята двуокись германия, из которой в реакции



получалась нерастворимая комплексная соль — гексафторгерманиат бария  $BaGeF_6$ , которая при нагревании в вакууме до температуры выше 500 °С разлагается с выделением четырехфтористого германия:



Установка для разложения  $BaGeF_6$  описана в [2]. Высушенный порошок  $BaGeF_6$  загружался в кварцевую колбу. Ловушка для вымораживания  $GeF_4$  была из обычного химического стекла и охлаждалась

жидким азотом. Получаемый газ собирался в стеклянные колбы. Соединения выполнялись из коротких вакуумных резиновых шлангов; стеклянные краны были исключены, так как  $GeF_4$  реагирует с вакуумной смазкой. Перед началом работы колба с  $BaGeF_6$  прогревалась до 300 °С и вся установка откачивалась форвакуумным насосом (в течение 2 ч). Разложение  $BaGeF_6$  проводилось при температуре 900 °С, измеряемой термопарой. Давление газа не контролировалось из-за его агрессивности ( $GeF_4$  реагирует со ртутью); по той же причине не контролировался расход газа при подаче в источник.

Исследование работы ионного источника для получения ионов германия проводилось на стенде ионных источников [3] и циклотроне У-150 [4]. Подача  $GeF_4$  в ионные источники из стеклянной колбы осуществлялась через обычно используемый газопровод из медной трубки, соединения — из коротких трубок из вакуумной резины. Тракт подачи  $GeF_4$  не должен иметь следов масла или влаги; особое внимание обращалось на чистоту игольчатого вентиля, осуществляющего дозировку газа.

На стенде источник работал на  $GeF_4$  при напряженности магнитного поля  $\sim 5,5$  кэ. Напряжение, вытягивающее ионы из источника, составляло 13 ÷ 15 кэ. Недостаточная разрешающая способность стенда (не превышающая 50 [3]) и наличие большого количества ионов фтора и легких примесей (кислорода и азота) не позволили провести на стенде исследование возможностей получения в источнике ионов германия с зарядностью выше +6. Идентификация пиков ионов германия на спектрограммах осложнялась еще и тем, что германий имеет пять стабильных изотопов с массовыми числами от 70 до 76, ионы которых не разрешаются

цевых экранов; ионный ток измерялся цилиндрами Фарадея. При оптимальных условиях на входе накопителя ток пучка  $H^-$  составляет 0,9 ÷ 1,2 ма; поперечный размер пучка  $\sim 1$  см при угловом растворе  $\sim 0,5 \cdot 10^{-2}$  рад.

Система стабилизации энергии позволяет получать от ускорителя ионный ток до 3 ма при длительности 1 мсек. Исследование на стенде ионного источника, аналогичного установленному на ускорителе, показало, что конструкция и параметры последнего не являются оптимальными. Повышение вытягивающего напряжения и напряженности магнитного поля, а также изменение режима разряда и геометрии источника позволили увеличить выход  $H^-$  до 6 ма.

Таким образом, имеется возможность в ближайшее время повысить в несколько раз интенсивность пучка отрицательных ионов водорода на выходе электростатического ускорителя.

В заключение авторы выражают благодарность Г. И. Будкеру за обсуждение работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. И. Будкер, Г. И. Димов, А. Г. Попов, Ю. К. Свиридов и др., Атомная энергия, 1965, 19, 507.
2. C. E. Hollandsworth, S. G. Buccino, P. R. Bevington, Nucl. Instrum. and Methods, 1964, 28, 353.
3. K. W. Ehlers, V. F. Gavin, E. L. Hubbard, Nucl. Instrum. and Methods, 1963, 22, 87.

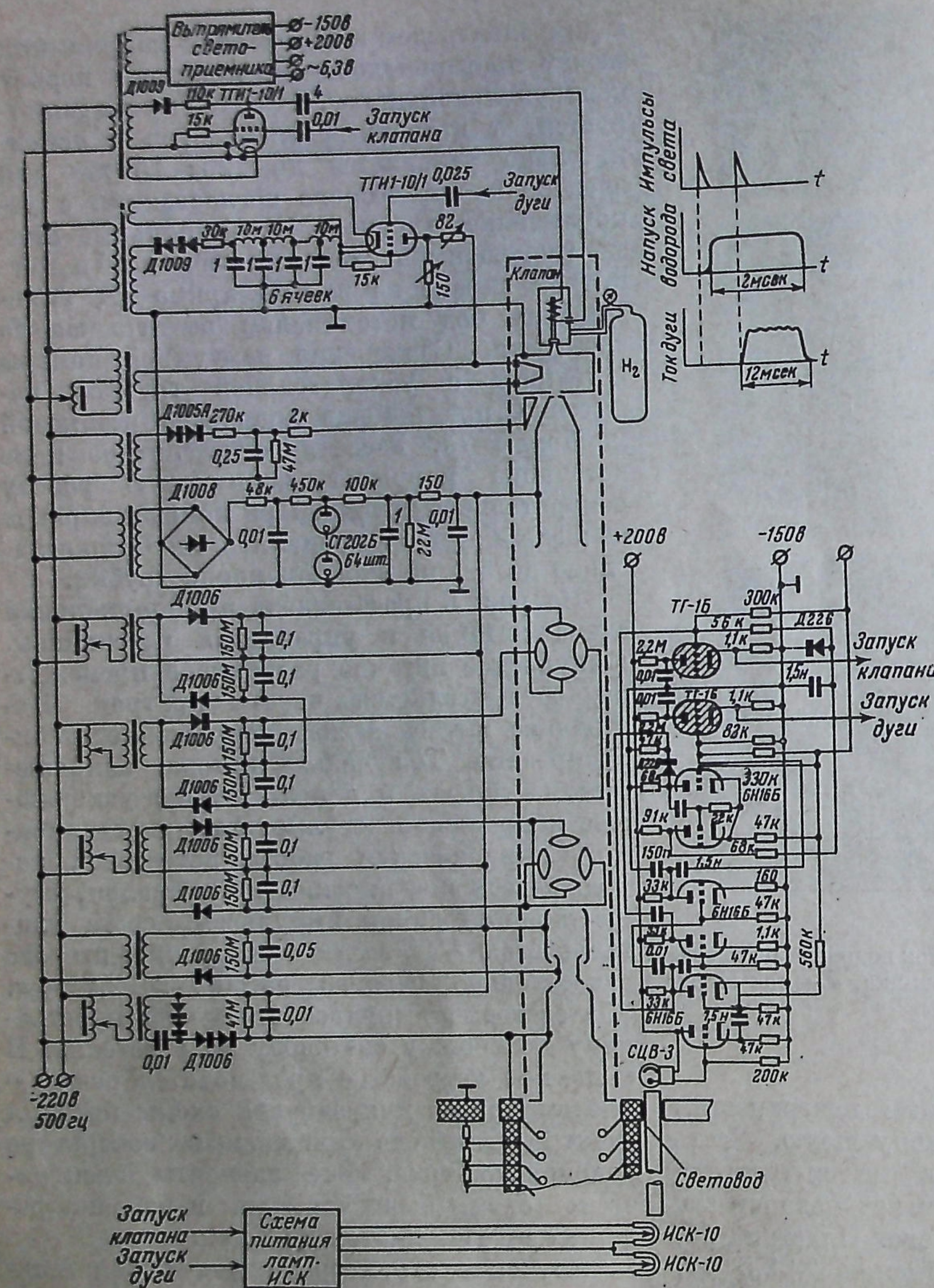


Рис. 5. Схема питания источника отрицательных ионов водорода. (Поправка: следует поменять местами надписи «запуска клапана» и «запуск дуги»)

из анализатора ионный пучок фокусируется магнитной квадрупольной линзой на вход накопителя. Апертура анализатора —  $20 \times 40$  мм<sup>2</sup>, апертура линз —  $60 \times 60$  мм<sup>2</sup>. Для удобства работы на выходе ускорительной трубки пучок корректируется по направлению катушками, создающими поперечные магнитные поля. Поперечные размеры пучка наблюдались при помощи квар-