

В.В.Демидов, Г.И.Димов,
В.Г.Дудников, И.Я.Тимошин

**Получение пучка отрицательных ионов
водорода с энергией до 1,5 мэв и током до 1 ма**

В Институте ядерной физики СО АН СССР в конце 1965 года от ускорителя Ван-де-Граафа на 1,5 Мэв получен пучок отрицательных ионов водорода с током в импульсе до 1 ма. Этот пучок предназначен для инъекции протонов в накопительное кольцо перезарядным методом /1/.

На ускорителе установлен источник ионов H^- , работающий в режиме одиночных импульсов длительностью до 1,5 мсек с внешним запуском. Ускорение ионов производится за счет накапливаемой между импульсами энергии электростатического поля ускорителя. Падение напряжения на ускорительной трубке во время импульса ионного тока компенсируется с помощью лайнера, входящего в систему стабилизации энергии ионов. На рис.1 представлена схема этой стабилизации. Она осуществляется по двум каналам.

По первому каналу с полосой пропускания от 0 до 0,5 гц стабилизируется постоянная составляющая напряжения на ускорителе, 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. С целью повышения чувствительности роторного вольтметра приняты меры для снижения минимального уровня сигнала ошибки: статорная пластинка, 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 порядка 1 часа равно $\sim 0,05\%$. Наблюдавшиеся с помощью ёмкостного делителя колебания напряжения на ускорителе составляют $\pm 0,15\%$ на частоте вращения ленты (~ 5 гц), $\pm 0,08\%$ на частоте 50 гц и $\pm 0,08\%$ на частоте ~ 1 гц.

Второй канал схемы стабилизации работает синхронно с импульсом ионного тока и имеет полосу пропускания от 20 гц до 200 кгц. Сигнал от целевого датчика магнитного анализатора при

прохождении ионного пучка управляет напряжением на лайнере, которое может изменяться от 10 до 50 кв. Коэффициент усиления этого тракта $10^4 + 10^5$, 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 представлена 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 часа изменяется на 6,5 кв при энергии 1 Мэв. За время импульса ионного тока длительностью 1 мсек амплитудой в 1 ма напряжение на лайнере уменьшается на 10 кв в соответствии с расчетом (ёмкость между высоковольтным электродом и лайнером ~ 100 пф). Наблюдение за ионным пучком после поворота его магнитным анализатором на угол $\frac{\pi}{2}$ показало, что нестабильность угла поворота не превышает 10^{-3} радиан. 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 представлен на рис. 3. Постоянный магнит (6), создающий магнитное поле напряженностью 1800 э, собран из брусков сплава АНК₀-4, его стальные полюса вварены 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 токоподводам (2) стальными винтами. Верхняя рабочая часть катода имеет размеры 4x4 мм² и удалена от токоподводов на 10 мм, концы катода имеют ширину 7 мм. Потребляемая катодом мощность ~ 180 вт. Токоподводы изолируются с помощью 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 диаметром 5 мм. Зазор между катодом и анодом 2 + 3 мм. В разрядный ка-

нал анода через 8 продольных щелей $10 \times 0,5$ мм² в его стенке производится импульсный напуск водорода. Водород поступает из бака высокого давления (до 100 атм) 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 3×3 мм², запрессованной в анод со стороны катода. Дуга является мощным источником электронов, которые при столкновениях с молекулами водорода с вероятностью $10^{-5} + 10^{-6}$ образуют ионы Н⁻. С этим процессом конкурирует развал Н⁻ с вероятностью порядка 1 при их соударениях с нейтральными и заряженными частицами. Через продольную щель 20×1 мм², вырезанную в стенке анода толщиной 1,5 мм, отрицательные ионы вытягиваются отсасывающим электродом (10), находящимся под потенциалом +4,8 кв. Отсасывающий электрод укреплен непосредственно на аноде с помощью изолирующей керамической пластины. Выход Н⁻ зависит от величины и распределения плотности водорода и электронов, а также от температуры электронов. Распределение электронов поперёк разрядного канала и их температура зависят от режима дугового разряда. Более благоприятные условия для выхода Н⁻ создаются при несамостоятельном разряде с повышенным падением 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. Необходимо подбирать оптимальный режим дугового разряда и плотность водорода. В описываемом источнике оптимальный разрядный ток ~ 5 а, напряжение на дуге 200 + 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/см³, толщина водородного слоя между поверхностью дуги и отсасывающим электродом $\sim 10^{15}$ молекул/см².

Расход водорода за один импульс $6 \cdot 10^{-6}$ см³. На рис.4 представлены осциллограммы потока водорода (а), тока дуги (б) и вытягиваемого тока отрицательных ионов (в). Чтобы уменьшить импульсную нагрузку водородом ускорительной трубки, объём вакуумной камеры источника увеличен до 10 л. Время откачки этой камеры $\sim 0,1$ сек. При проводимости ускорительной трубки в ~ 500 л. водорода/сек, давление в верхней её части не превышает $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. в импульсе.

Вместе с отрицательными ионами из разряда вытягиваются электроны, которые дрейфуют по эквипотенциальным поверхностям перпендикулярно магнитному полю. Часть электронов диффундирует на отсасывающий электрод, часть их достигает поверхности изолятора и нарушает её. Пластина (15), находящаяся под потенциалом +2,5 кв, установлена таким образом, чтобы на пути дрейфа электронов создать параллельное магнитному электрическое поле. Электроны притягиваются к пластине, поток электронов на изолятор прекращается, ток электронов на отсасывающий электрод снижается со 100 до 20 ма и вероятность пробоя с отсасывающего электрода уменьшается.

Ленточный пучок ионов, ускоренных в отсасывающем зазоре, поворачивается магнитным полем на угол $\sim 70^\circ$ и фокусируется парой электростатических квадрупольных линз (16) в 15-ти см. от входа в ускорительную трубку. Траектория ионов корректируется поворотом анода вместе с отсасывающим электродом и изменением напряжения между противоположными полюсами первой квадрупольной линзы. В фокусе пучок фильтруется от вторичных электронов и дополнительно ускоряется до 12+15 кэв для электронно-оптического согласования с ускорительной трубкой. Квадрупольные линзы размещены в электростатическом и магнитном экране из армо-железа (17), находящемся под потенциалом отсоса. Сочленение вакуумной камеры источника с ускорительной трубкой нежёсткое с помощью кольцевой резиновой мембраны (18). Рассеянное магнитное поле источника нарушает нормальную работу ускорительной трубки. С помощью экранов из армо-железа 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. Напряжение отсоса ионов постоянное и стабилизировано. Ток накала катода, напряжения на линзах и ус-

корящее напряжение регулируются дистанционно. Синхронизация работы источника, находящегося под высоким потенциалом, осуществляется двумя импульсами света длительностью ~ 25 мксек с задержкой второго, относительно первого, на 500 ± 1500 мксек. Оба световых импульса поступают к источнику по общему световоду из оргстекла. В приёмном 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 с помощью пластинчатого коллектора показало, что пучок фокусируется в пятно с размерами 4×4 мм². Угловой растроп пучка после прохождения фокуса вдоль магнитного поля источника $\sim 0,07$ радиан, поперёк магнитного поля - $0,14$ рад. На выходе ускорителя в двух метрах от конца ускорительной трубки пучок фокусируется в пятно с поперечными размерами в 10 мм, что согласуется с расчётным увеличением трубки.

После выхода из ускорителя пучок Н⁻ дополнительно фокусируется электростатической квадрупольной линзой примерно в центр магнитного анализатора. После выхода из анализатора ионный пучок фокусируется магнитной квадрупольной линзой на вход накопителя. Апертура анализатора - 20×40 мм², апертура линз - 60×60 мм². Для удобства работы на выходе ускорительной трубки пучок корректируется по направлению с помощью катушек, создающих поперечные магнитные поля. Поперечные размеры пучка наблюдались с помощью кварцевых экранов; ионный ток измерялся цилиндрами Фарадея. При оптимальных условиях на входе накопителя ток пучка Н⁻ составляет $0,9 \pm 1,2$ ма; поперечный размер пучка 1 см при угловом растропе $0,5 \cdot 10^{-2}$ радиана.

Работающая система стабилизации энергии позволяет получать от ускорителя ионный ток до 3 ма при длительности 1 мсек. Исследование на стенде ионного источника, аналогично установленному на ускорителе, показало, что конструкция и параметры последнего не являются оптимальными. Повышение отсасывающего напряжения и напряжённости магнитного поля, а также изменение режима разряда и геометрии источника, позволили увеличить выход Н⁻ до 6 ма.

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

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

Л и т е р а т у р а

1. Будкер Г.И., Димов Г.И., Попов А.Г., Свиридов Ю.К., Сухина Б.Н., Тимошин И.Я. "Атомная энергия", 19, 507-510 (1965).
2. Hollandsworth C.E., Buccino S.G., Bevington P.R., "Nucl. Instrum. and Methods", 28, 353-354 (1964)
3. Ehlers K.W., Gavin B.F., Hubbard E.L., "Nucl. Instrum. and Methods", 22, 87-97 (1963)

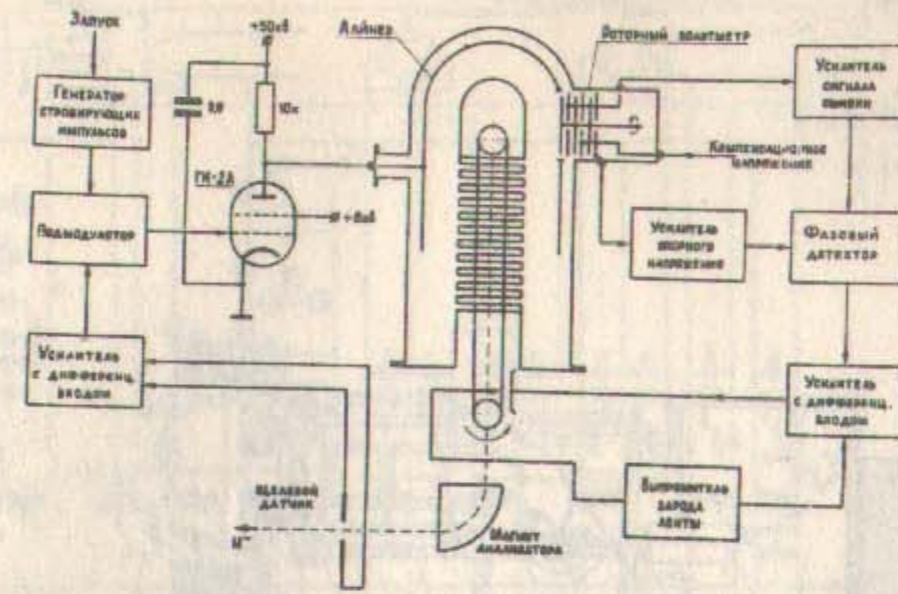


Рис. 1

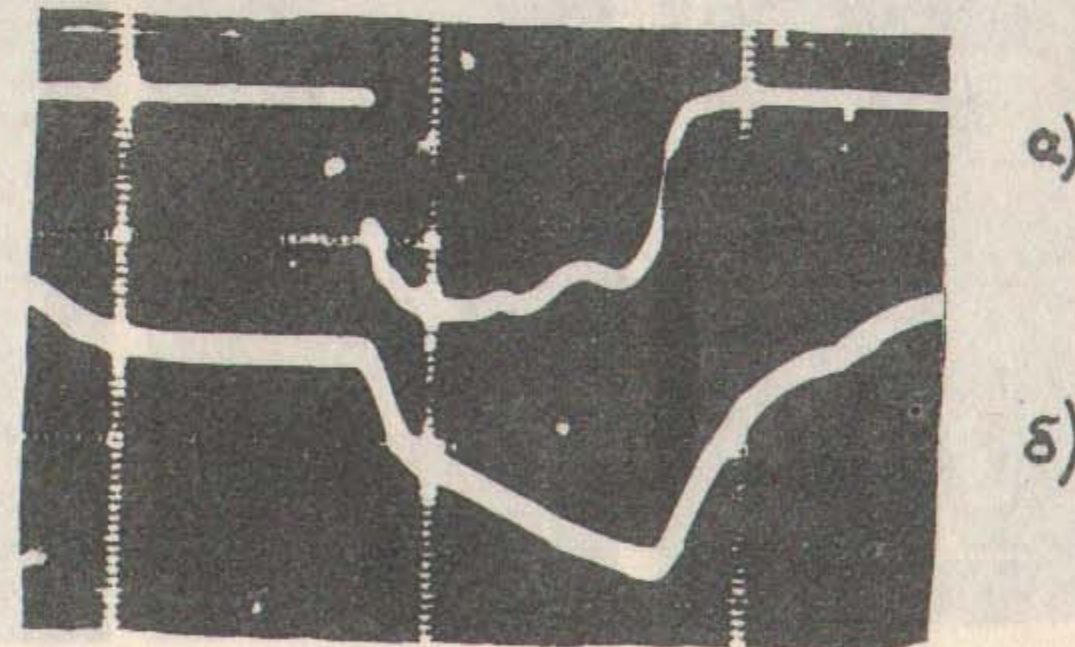


Рис. 2.

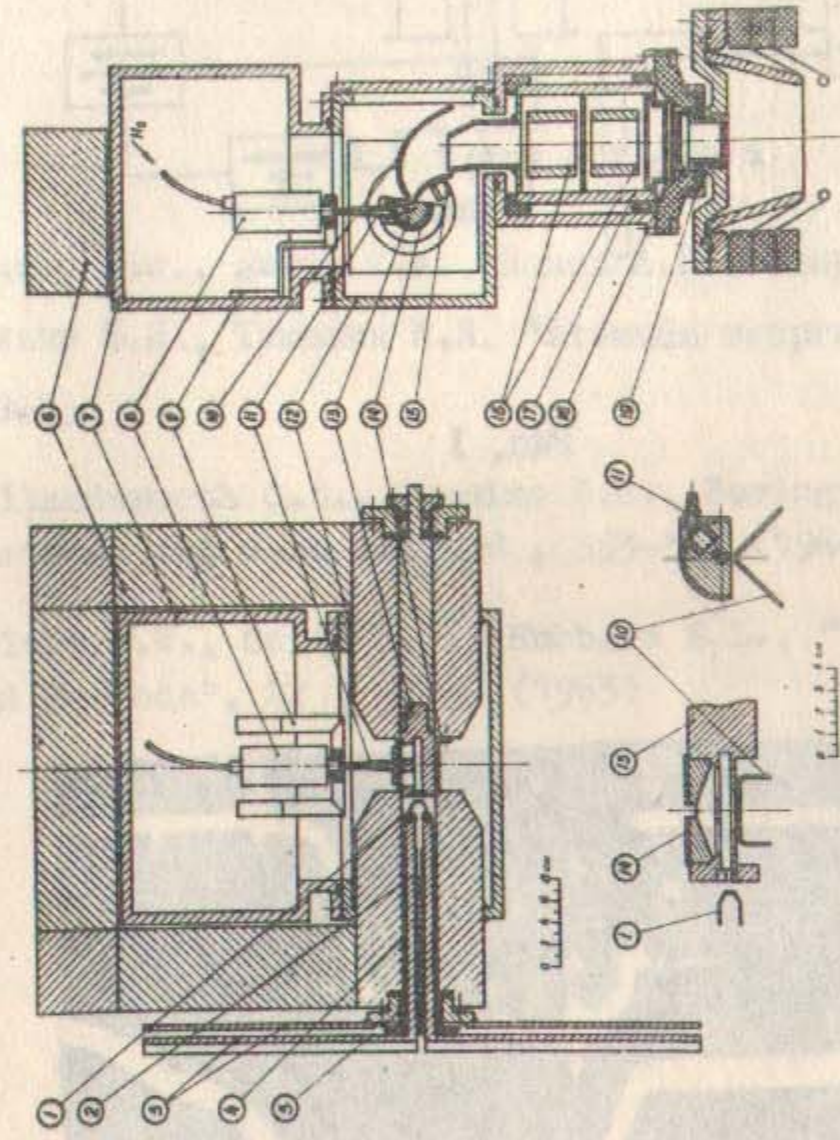


Рис. 8.

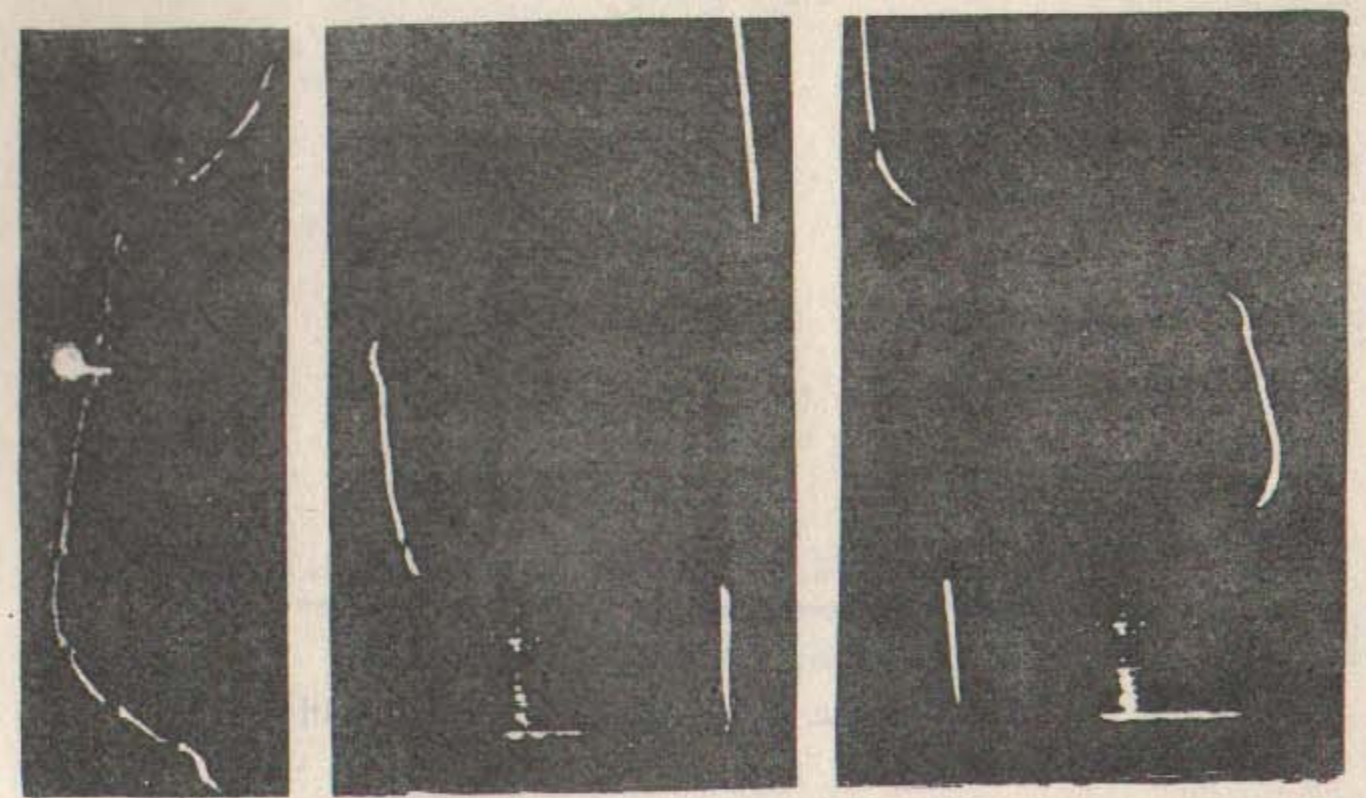


Рис. 4.

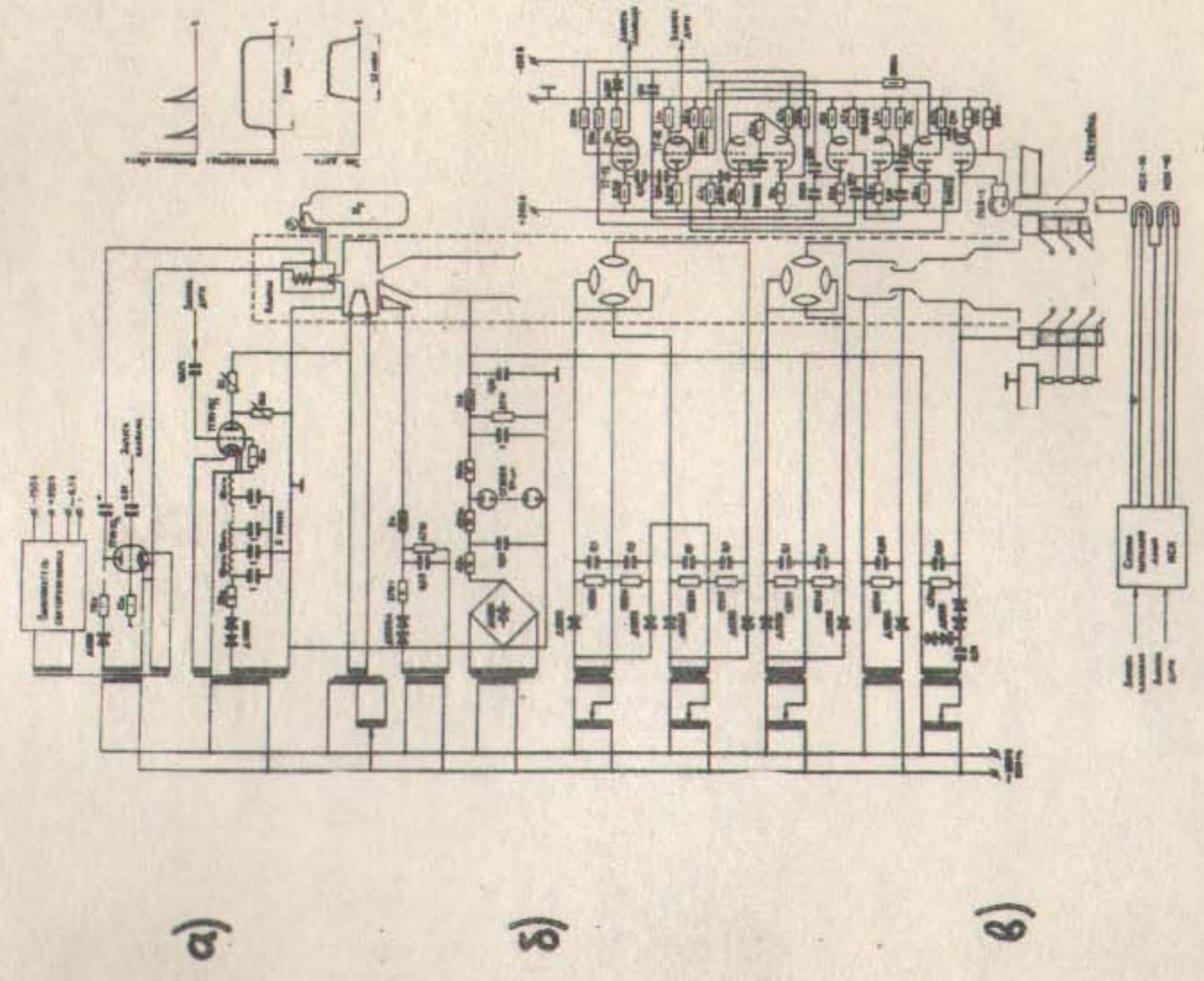
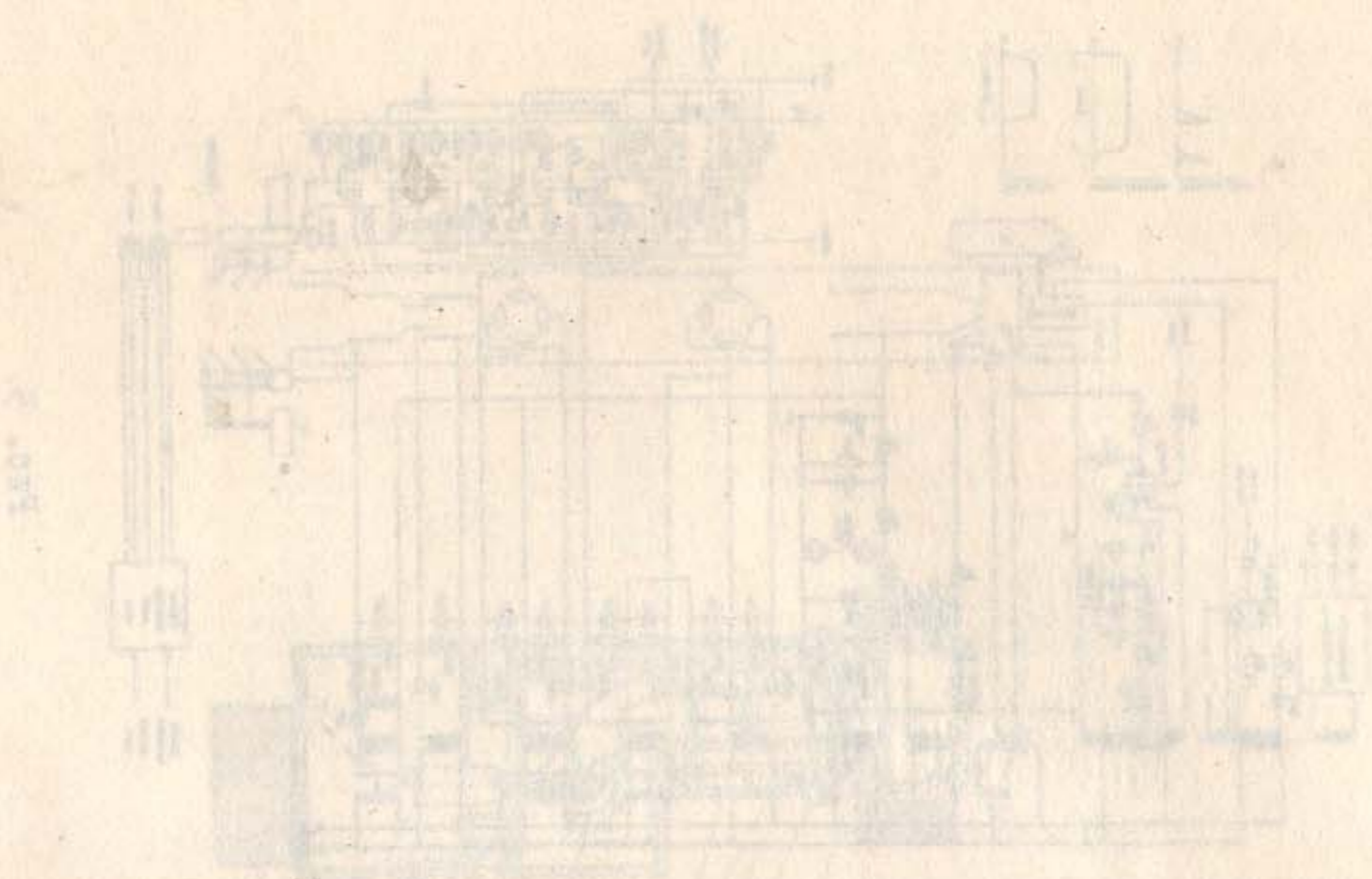


Рис. 5.



Ответственный за выпуск Демидов В.В.
Тираж 200 экз. Бесплатно
Отпечатано на роталпринте в ИИФ СО АН СССР
3.03-1966 г.