

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР

препринт 147

Для служебного пользования
Экз №

М.Ю.Гельцель, А.А.Подминогин

**Исследование работы управляемых
газоразрядных вентилях с твердым холодным
катодом в импульсном режиме**

г.Новосибирск 1967

Для служебного пользования

М.Ю.Гельцель, А.А.Подминогин

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ УПРАВЛЯЕМЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ВЕНТИЛЕЙ
С ТВЕРДЫМ ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

А Н Н О Т А Ц И Я

Рассматриваются некоторые особенности работы управляемых газоразрядных вентилях с твердым холодным катодом в импульсном режиме.

Даны результаты исследований вентилях с короткой дугой (~ 5 мм), работающих без специального газового наполнения при начальном давлении $10^{-2} - 10^{-3}$ мм рт.ст. Вентильные свойства такого прибора надежно сохраняются при коммутации синусоидальных импульсов тока с амплитудой до 55 кА при скорости нарастания тока $\sim 3 \cdot 10^8$ а/сек и обратном напряжении до 10 кв.

1) Подминогин А.А.

В В Е Д Е Н И Е

Основная цель настоящей работы заключалась в улучшении параметров управляемых вентилях, разработанных в Институте ядерной физики (ИЯФ) СО АН СССР. Наибольший интерес представляет работа таких вентилях в импульсном режиме. Поэтому важнейшими параметрами, улучшение которых составило предмет исследований в ИЯФ, явились импульсные параметры: максимальная электрическая прочность, вентиляльная прочность и предельный импульсный ток.

В /1,2/ сообщалось о работах по управляемым импульсным вентилям с твердым холодным катодом в Институте ядерной физики СО АН СССР. Там же приводилось описание некоторых конструкций вентилях подобного типа. Ниже даны результаты дальнейших исследований вентилях с относительно длинной дугой (с расстоянием между электродами $d \geq 20$ мм), описанных в /1,2/ и рассмотрена работа вентиля с короткой дугой ($d \sim 5 + 8$ мм).

Электрическая прочность разрядного промежутка определяется, как известно, произведением $p_0 d$ (где p_0 - начальное давление, d - длина промежутка) и этими же параметрами в той или иной мере определяются трудности иницирования дугового разряда в этом промежутке. Таким образом, способ зажигания дуги в вентиле связан с его электрической прочностью. Поэтому в конструкциях с электронным поджигом (типа разрядника Пеннинга) расстояние между электродами относительно большое (20 + 30 мм) и электрическая прочность понижена. При использовании иницирующего разряда между вспомогательным электродом и катодом появляется возможность значительно уменьшить расстояние между основными электродами. Так одним из авторов¹⁾ была разработана, а затем совместно испытана конструкция вентиля с короткой дугой (5 + 8 мм), имеющая высокую электрическую прочность (> 20 кВ).

Очевидный интерес представляет вопрос об электрической прочности прибора в момент прохода тока нулевого значения - вопрос о величине вентиляльной прочности. Исследование последней в вентилях с относительно длинной дугой /2/ показали, что существенное влияние на величину вентиляльной прочности оказывает схема соединения электродов с вакуумной камерой. Было показано,

1) Подминогиным А.А.

что при наличии двух последовательных разрывов в зазорах, много меньших чем основной разрядный промежуток, вентильная прочность прибора увеличивалась ~ в 2 раза. Исследования показали, что движение дугового разряда при начальном низком давлении лучше начинать с большого зазора, а заканчивать на меньшем, т.е. разрядный промежуток выполнять с переменным расстоянием между электродами. Исходя из этого положения понятия относительно длинной дуги и короткой дуги относятся к начальной стадии образования её, поскольку целесообразно варьировать величину разрядного промежутка только в центральной части электродов - месте поджига. Расстояние между основными электродами в этом месте определяется необходимой электрической прочностью вентиля перед поджигом, а осевой зазор должен быть минимально возможным для получения максимальной вентильной прочности.

Для исследования движения дугового разряда использовалась скоростная фоторегистрирующая аппаратура типа СФР.

I. Электрическая прочность и зажигание дугового разряда

Как известно, в импульсных вентилях электрическая прочность является принципиально важным параметром. Этот параметр определяется, главным образом, электрической прочностью разрядного промежутка при соответствующем давлении рабочего газа. Давление газа выбирается оптимальным из условия инициирования дугового разряда при заданном типе поджигающего устройства, с одной стороны и получения максимальной электрической прочности промежутка до подачи поджигающего импульса, с другой.

На рис.1 дается один из вариантов конструкции управляемого вентиля при использовании короткой дуги²⁾. На рис.(фото) 2 дан общий вид прибора.

На рис.3 приведены экспериментально снятые кривые напряжения зажигания $U_z = f(p \cdot d)$ в рассматриваемых вентилях при

$d \geq 20$ мм. Электрическая прочность измерялась на холодном вентиле без явлений, связанных с дуговым разрядом. Методика и схема измерения даны в /2/. Для очищения водорода от примесей и паров использовался палладиевый натекагель, но даже при использовании

2) Детали конструкции поясняются в подписях к рисункам.

последнего потенциал зажигания ниже, чем в чистом водороде³⁾. Для выяснения влияния величины d на потенциал зажигания сняты кривые U_z для трех значений d (75 мм, 20 мм и 6 мм). Известно, что в однородных электрических полях для зажигания разряда в водороде при $pd < (pd)_{\text{мин}}$ наблюдается отклонение от закона подобия и потенциал зажигания $U_z = f(pd^{0.58})$ /3/. В рассматриваемом случае также оказалось, что давление более резко влияет на U_z , нежели расстояние d . Электрическая прочность в вентилях с $d \sim 5 + 10$ без специального газового наполнения измерялась только при рабочем давлении $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. и составляла > 20 кв.

Для получения максимальной электрической прочности и одинаковой величины потенциала зажигания в обоих направлениях необходимо использовать однородное поле и, следовательно, между геометрическими размерами электродов вентиля должны существовать следующие соотношения /4,5/:

$$\left. \begin{array}{l} d \leq 0,3D \\ d \geq \delta \end{array} \right\} \text{при условии, что } \delta \text{ достаточно мала (5-8 мм).}$$

Здесь: d - расстояние между электродами (мм)

D - диаметр электродов (мм)

δ - величина зазора между торцами электродов и стенками вакуумной камеры. При выполнении этих условий электрическая прочность остается практически неизменной для любой полярности напряжения на электродах и любой комбинации соединения электродов с вакуумной камерой. На рис.4 изображены схемы соединения электродов и вакуумной камеры. Результаты измерений напряжения пробоя для этих схем приведены в таблице I.

Начальное давление водорода выбиралось исходя из величины зазора порядка $(4 + 8) \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. При этом величина составляла $3 + 0,5$ см. Вентиль с водородным наполнением может работать как с относительно длинной дугой ($d \geq 20$ мм), так и с короткой дугой ($d \leq 10$ мм), а вентиль без водорода только с короткой дугой ($p_0 \leq 10^{-2}$ мм рт.ст.).

3) После обработки дуговым разрядом электрическая прочность увеличивалась при давлениях $\geq 5 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. и оставалась практически неизменной при давлениях $\leq 5 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст.

Таблица I

Тип вентили	Схема включения электродов	Напряжение пробоя (кв)	Примечание
Рис. I	а	10,5	1. Измерения велись при давлении водорода $p_0 = 6,5 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. $d = 40$ мм, $\delta = 6$ мм. 2. Электрическая прочность промежутка для водорода по работе /6/ более 15 кв.
	б	10,5	
	в	10,5	
	г	6,5	
	д	7,0	
Рис. 2	б	> 20 кв.	3. Давление воздуха $p_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. $d = \delta = 5 + 7$ мм.

Как уже упоминалось в /1,2/ в отличие от вакуумных выключателей /7/ развитие дуги в описанных конструкциях управляемых вентилях инициируется искровым или тлеющим разрядом с большой плотностью тока. Поэтому представляет интерес рассмотреть некоторые особенности поджигающих устройств.

В случае, когда pd мало и средняя длина пробега электронов $\lambda \gg d$ — расстояния между электродами — использовался искровой поджиг, создающий вспомогательную дугу в малом зазоре (1–2 мм) при импульсном напряжении 15–20 кв и начальном давлении от 10^{-3} до 10^{-1} мм рт.ст. При использовании пробоя по диэлектрику (керамике) импульсное напряжение поджига снижалось до 5 кв. Такого рода поджигающие устройства надежно поджигают вентиль и работают достаточно долго при небольшой частоте повторения импульсов. При использовании такого типа поджигающих устройств на большой частоте повторения приходится увеличивать зазор в центральной части электродов до величины большей средней длины пробега электронов. В этом случае для создания нужной электрической прочности желательное наполнение вакуумной камеры водородом до соответствующего давления. Если вентили с короткой дугой

обеспечивает более высокую электрическую прочность, то вентили с относительно длинной дугой в центральной области обеспечивают возможность использования электронных поджигающих устройств, например, разрядника с полым катодом / I7/. Использование последних возможно также для конструкции с короткой дугой и электрической прочностью порядка 15 ± 20 кв при увеличении начального давления водорода до 10^{-1} мм.рт.ст. Использование короткой дуги ($\sim 5 + 8$ мм) при начальном давлении $p_0 \leq 10^{-3}$ мм.рт.ст. с искровым поджигом позволяет резко увеличивать прочность перед зажиганием дугового разряда (> 20 кв) и упростить эксплуатацию большого количества таких приборов, так как в них не требуется специального газового наполнения. Основная трудность, состоящая в защите поджигающего устройства от действия дугового разряда, может быть преодолена специальной конструкцией катода и поджигающего устройства. Одна из таких конструкций показана на рис. I. Поджигающее устройство в этом случае весьма простое и представляет собой диск с несколькими трубочками диаметром 3–4 мм, расположенных напротив отверстий в катоде, имеющих диаметр 4–5 мм. Зазор между трубочками и краями отверстий составляет 0,5–1 мм. В процессе работы происходит обработка краев отверстий и трубочек разрядом. Долговечность такого поджигающего устройства составляет $\sim 10^5$ импульсов. Фланец съемный и диск с трубочками может легко быть заменен при профилактике. Напряжение поджигающего импульса 15 кв, длительность импульса 2 мксек.

Таким образом возможно осуществить в вентиле с короткой дугой сочетание сравнительно долговечного поджигающего устройства с высокой электрической прочностью.

В настоящее время в лаборатории ведутся работы по использованию зажигания дугового разряда с помощью импульсного магнитного поля, позволяющего получить интенсивный разряд при начальном давлении водорода $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ мм.рт.ст. /8, 9/.

II. Развитие дугового разряда и вентильная прочность

Кратко рассмотрим некоторые особенности развития разряда и процессы, приводящие к гашению дуги в описанных выше конструкциях. При рассмотрении физических процессов воспользуемся литературой /10, 11, 12, 13/, применительно к данно-

му случаю дугового разряда и экспериментами, проведенными авторами настоящей работы. В случае использования искрового поджига начальная стадия развития дугового разряда происходит одинаково, независимо от расстояния между основными электродами. Первоначальное катодное пятно возникает на катоде в месте поджига. В последнем наряду с эмиссией электронов образуется значительное количество паров металла катода. В парах металла происходит ионизация. Энергия, необходимая для испарения металла в области катодного пятна доставляется к катоду в форме кинетической энергии положительных ионов и, отчасти, в форме джоулева тепла. Энергия, приобретаемая электронами и ионами в области катодного падения напряжения, является главным источником, поддерживающим процессы регенерации нейтральной среды и заряженных частиц. Таким образом, начальную стадию перехода в дуговой разряд можно представить себе следующим образом. Сначала электроны приобретают энергию в области катодного падения напряжения, затем производят ионизацию паров металла, затем возникает ионный ток. Доставка этим током энергия накапливается в форме тепла в металле катода и лишь потом испаряющиеся атомы металла поступают в разрядный промежуток и процесс, принимая лавинообразный характер, заканчивается переходом в дугу.

Энергия, необходимая для поддержания требуемой концентрации среды должна доставляться в первоначальное катодное пятно источником поджига до момента появления равноценной величины её за счет основного тока разряда. Можно показать, что всегда могут быть получены такие условия, при которых выполняется условие непрерывности тока или условие обеспечения ионизационного процесса при переходе из тлеющего или искрового разряда в дугу /II/. В этом случае нестационарные процессы при формировании разряда малы.

Как уже упоминалось /I,2/ в случае сравнительно длинной дуги ($d \geq 20$ мм) нестационарные процессы в вентиле играют существенную роль. Изменение материала катода, добавление в водород более тяжелого газа, например аргона, хотя и уменьшают величину нестационарных процессов, но не решают этот вопрос до конца. Известно, что неустойчивость водородной дуги связана с её температурой, поэтому возможность уменьшения последней увеличивает устойчивость дуги. В то же время уменьшение температуры дуги

легко достигается уменьшением её длины. Использование короткой дуги таким образом облегчает задачу устранения нежелательных перенапряжений, вызванных обрывными колебаниями в дуге. Практически в короткой дуге не было обнаружено обрывов дуги в течение длительного времени.

Как известно, переход от стадии пробоя к стадии дуги характеризуется повышением давления в разрядном промежутке, режимом увеличением тока и уменьшением напряжения на электродах вентиля.

Существенной особенностью дуги вентиля с твердым холодным катодом является то обстоятельство, что кроме электрических процессов в ней происходит автогенерация нейтральной среды посредством испарения и дальнейшей ионизации паров металла. В этом случае концентрация частиц, вызванных процессом эмиссии электронов при испарении катода значительно больше концентрации частиц при начальном давлении. Известно, что при начальном давлении $5 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. концентрации частиц в единице объема

$n = 7 \cdot 10^{13}$ I/cm³, а концентрация частиц, вызванная процессом эмиссии электронов при испарении катода составит, например, для меди, при скорости нарастания тока $di/dt = 10^8$ а/сек за время $\Delta t = 10^{-6}$ сек, величину большую на один - два порядка $n' \approx (10^{14} + 10^{15})$ I/cm³.

Сравнительная оценка газокинетического давления, приводящего к расширению разряда, и магнитного давления, сжимающего разряд, показывает, что через промежуток времени $\Delta t = 10^{-6}$ сек при скорости нарастания тока $di/dt = 10^8$ а/сек первое давление много больше второго. Такое положение способствует расширению разряда от центра к стенкам камеры. Скорость расширения канала разряда составляет по данным работ /I2, I3/ $\sim 10^5$ см/сек.

Такая же скорость движения разряда была получена в процессе горения относительно длинной дуги авторами /2/ с помощью осциллограмм, показывающих запаздывание тока с боковой поверхности камеры по сравнению с током, проходящим центральную часть катода.

Описанные ниже эксперименты, детализируя это положение, позволили исследовать зависимость скорости движения разряда от

скорости поступления в него энергии от источника. Для этого в нижней части катода было сделано большое количество отверстий, закрытых прозрачным материалом (органическим стеклом), через которые велись наблюдения и регистрация движения разряда от места поджига в центральной части катода к боковой поверхности. Скоростной фоторегистратор типа СФР при скорости 7500 об/мин и 2-х рядной вставке позволил получить частоту съемки в варианте дупы времени $\sim 8 \cdot 10^4$ кадров в секунду ($\Delta t = 13$ мксек).

На основании фотографий, полученных с помощью СФР сравнивалось движение разряда в случае относительно небольших токов ($до 7,5$ кА) и токов порядка 30 кА при одной и той же длительности импульса — 500 мксек, а также движение разряда при одном и том же токе, но при разных длительностях импульса (500 и 1250 мксек). Из фотографий было видно, что разряд при этих условиях никогда не возвращался к центральной части катода. В тоже время наблюдение за эрозией электродов и состоянием анодного изолятора показали, что разряд не доходит до последнего даже при больших длительностях импульса (2–3 мсек). Осциллограмма падения напряжения в дуге показывает, что в процессе движения разряда оно падает от 50 до 15 в (рис.5).

Наблюдение за развитием разряда и эрозией электродов, а также фотографии движения дугового разряда, сделанные с помощью СФР позволяют сделать следующие выводы:

1. Скорость движения дугового разряда в целом пропорциональна скорости нарастания тока или, иначе, скорости поступления энергии от источника. Движение разряда в его начальной стадии происходит или равномерно во все стороны от центра — места поджига — или с явной асимметрией в какую-либо сторону. Удобнее рассмотреть случай одновременного движения разряда во все стороны по аналогии с расширяющимся цилиндрическим каналом плазмы. Из /13/ следует, что зависимость радиуса расширяющегося цилиндрического канала плазмы от времени и от вкладываемой энергии можно определить следующим образом /13/:

$$z = \sqrt{\frac{w(t) - w_y(t)}{0,44} + z_0^2}, \text{ где}$$

t — время расширения канала,

z_0 — начальный его радиус при $t = 0$,

$w(t)$ — энергия, поступающая в канал,

$w_y(t)$ — потери энергии с ростом температуры.

При скорости нарастания тока $2 \cdot 10^8$ а/сек, падении напряжения в короткой дуге 25–30 в, начальном радиусе несколько миллиметров через отрезок времени $\sim 10^{-5}$ сек радиус канала разряда составит $\sim 0,8$ см (без учета потерь энергии). Следовательно скорость расширения разряда на фиксированном расстоянии от центра должна составлять $8 \cdot 10^4 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$. Из анализа снимков, сделанных СФР, при длительности импульса $\tau = 500$ мксек и амплитуде тока 30 кА

средняя скорость движения разряда на этом же расстоянии равна

$$\sim 5 \cdot 10^4 \text{ см/сек.}$$

Таким образом, если при расчете принять во внимание потери энергии, то скорости, полученные при расчете и экспериментально совпадают с достаточной точностью.

2) Движение разряда происходит по направлению вводов вентиля, начинаясь в центральной части электродов. Поскольку разряд при импульсах $\tau \geq 1000$ мксек проходит весь путь от центра до верхнего зазора между анодом и катодом быстрее, чем нарастает ток до максимальной величины и далее не распространяется, то можно сделать заключение, что скорость движения разряда при подходе к вводам вентиля резко падает. Это, по-видимому, объясняется с одной стороны увеличением сопротивления движению разряда за счет магнитного давления, создаваемого током на вводах вентиля, а с другой стороны уменьшением к тому времени плотности паров, а следовательно, и давления в центральной части электродов. В результате к концу цикла коммутации тока разряд начинает двигаться обратно, но гаснет не успевая дойти до центральной части электродов. Эта же картина движения разряда подтверждается видом эрозии катода и анода. Таким образом, основной причиной непрерывного движения разряда при начальном низком давлении являются локальные газокинетические давления, образующиеся в результате испарения металла в районе катодных пятен и лишь при подходе разряда к вводам вентиля начинает действовать тормозящая сила магнитного давления, создаваемого локализацией тока у вводов. В центральной части ток растекается по большой площади электродов и тормозящее действие магнитного давления невелико.

3) Скорость распространения разряда, измеренная на фиксированном расстоянии от оси камеры при уменьшении длины дуги, при прочих равных условиях, падает. При уменьшении расстояния между электродами от 30 мм до 5 мм скорость движения разряда падает

\sim в 2 раза.

4) В момент прохода током нулевого значения разряд идет практически на боковых поверхностях электродов. Если конструкция вентиля позволяет образовывать в этот момент времени короткий зазор между электродами, то условия гашения дуги и деионизации улучшаются и вентиляльная прочность оказывается достаточно большой.

5) Исходя из данных скорости движения разряда, длительности импульса коммутируемого тока и величины тока можно определить конструкцию вентиля: его диаметр, высоту и т.п. для требуемого случая. В ней должны быть использованы электроды, профилированные таким образом, чтобы движение разряда непосредственно после действия поджига происходило в центральной части электродов с большей скоростью, нежели на периферии. Это позволяет получить более равномерное распыление электродов вблизи поджигающего устройства.

В заключение кратко рассмотрим процессы деионизации при значении коммутируемого тока вблизи нуля.

Расширение катодных пятен значительно отстает от скорости расширения канала разряда /14/ и поэтому в случае достаточно длинной дуги ($d \geq 2-3$ см) центральная часть разряда при достижении края электродов продолжает двигаться дальше и образует прогиб дуги. При вытягивании дуги растет её длина, что приводит к росту напряжения в зоне горения. Снижение проводимости дуги к концу разряда (при спадании температуры и величины разрядного тока) приводит к потуханию дуги. В работе /15/ на основе рассмотрения процесса обмена энергией на центральном участке столба дуги дается критическое значение напряжения для потухания дуги.

Существенную роль в гашении дуги играют деионизационные процессы, особенно при короткой дуге. При погасании дуги, как известно, должно быть выполнено условие /16/:

$$\left| \frac{dn}{dt} \right|_{\tau} + \left| \frac{dn}{dt} \right|_{I} < \left| \frac{dn}{dt} \right|_{R} + \left| \frac{dn}{dt} \right|_{D}$$

где $\left| \frac{dn}{dt} \right|_{\tau}$ - скорость образования ионов путем термической ионизации,

$\left| \frac{dn}{dt} \right|_{I}$ - скорость образования ионов путем ударной ионизации,

$\left| \frac{dn}{dt} \right|_{R}$ - скорость исчезновения ионов за счет рекомбинации,

$\left| \frac{dn}{dt} \right|_{D}$ - скорость исчезновения ионов за счет диффузии.

Можно показать, что в нашем случае в установившемся режиме горения дуги $\left| \frac{dn}{dt} \right|_{I} \approx \left| \frac{dn}{dt} \right|_{R}$, а при погасании дуги образование ионов за счет ударной ионизации резко падает и в то же время скорость рекомбинации возрастает. Особенно сильно возрастает

$\left| \frac{dn}{dt} \right|_{R}$ в случае рекомбинации на стенках вакуумной камеры. Поэтому для надежного гашения дуги при проходе током нулевого значения большую роль играет направление движения дугового разряда. В общем случае, когда вакуумная камера находится под плавающим потенциалом, а разряд двигается к стенкам камеры, при вытягивании дуги создаются два разрядных промежутка с малыми зазорами и восстановление электрической прочности идет быстрее, чем в одном большом зазоре. Однако следует заметить, что в этом случае имеется вероятность того, что при больших токах разряд может дойти до анодного изолятора. Это нежелательно, так как вызовет уменьшение электрической прочности. По расчетам и измерениям постоянная спада давления значительно больше постоянной времени деионизации. Следовательно восстановление прочности после дугового разряда определяется двумя процессами, один из которых обуславливает большую скорость восстановления за счет рекомбинации частиц на стенках камеры и электродах. Второй процесс обуславливается относительно медленным спаданием плотности паров металла и газа. К моменту прохода тока через нулевое значение давление паров спадает на 60-70% от максимального (рис.6). Поэтому вентиляльная прочность при больших токах значительно ниже электрической и определяется, в основном, спадом давления в разрядном промежутке. При малых токах (сотни ампер) давление падает очень быстро и к проходу тока через нулевое значение равно начальному. Во всех случаях вентиляльная прочность является функцией времени, тока, а также скорости нарастания обратного напряжения. Путем экспериментов установлены предельные величины импульсных токов, обеспечивающие к моменту появления обратного напряжения на электродах такую плотность паров в разрядном промежутке и такую концентрацию электронов и ионов, при которых восстанавливающая электрическая прочность промежутка превысит это напряжение.

Скорость развития разряда в управляемых вентилях с искровым поджигом, описанных выше, менее 1 мксек. Такова же нестабильность разряда от импульса к импульсу. Сравнительно малый

разброс во времени развития разряда позволил легко осуществить параллельное и последовательное соединение приборов, необходимое для создания систем питания э/магнитов синхротронов с токами 150 кА и более при напряжении $5 + 10$ кВ в импульсе порядка 1,5 мсек.

Следует отметить, что конструкция вентиля, изображенная на рис. I, при наличии поджигающего устройства и во втором электроде позволяет коммутировать токи в обоих направлениях с минимальной задержкой по времени около 1 мсек. Такая возможность является отличительной чертой управляемых вентилях с твердым холодным катодом и однородным электрическим полем, поскольку направление тока в таких вентилях зависит только от относительной разности потенциалов между электродами. Таким образом, каждый электрод может выполнять как роль катода, так и роль анода и направление проводимости вентиля может изменяться путем перемены знака потенциала на электродах.

Авторы пользуются случаем принести благодарность Г.И. Гудкеру за развитие и поддержку тематики, затронутой в данной работе, а также В.С. Панаску за постановку работы, ценные советы и постоянный интерес к ней.

Л и т е р а т у р а

1. Гельцель М.Ю., Зусман В.Б. Управляемые газоразрядные вентили с твердым холодным катодом для коммутации больших импульсных токов (1966), изд. ИЯФ СО АН СССР. (Для служебного пользования)
2. Гельцель М.Ю., Тувик А.А. Некоторые особенности управляемого вентиля с вентильными свойствами в обоих направлениях (1967), изд. ИЯФ СО АН СССР. (Для служебного пользования).
3. Покровская-Соболева А.С., Клярфельд Б.Н. Ж. Эксперим. и теоретич. физики, 32, 991 (1957).
4. Гусева Д.Г. Зажигание разряда в неоднородных полях при низких давлениях газа. Радиотехника и электроника, т. IУ (1959).
5. Энгель А. Ионизованные газы. Физматгиз, стр. 246 (1959).
6. Гусева Л.Г. Зажигание разряда в молекулярных газах при $pd < (pd)$ мин. В кн. Исследование в области электрического разряда в газах. Госатомиздат (1958).
7. Попов Н.А. Вакуумные выключатели. Энергия, 1965 г.
8. Кучеренко Е.Т., Назаренко О.К. Особенности разряда с колебанием электронов в магнитном поле. Радиотехника и электроника № 8, (1959), 1253.
9. Josephson V. Low inductance gaseous switch tube Rev. Scient. Instrum. (1966) 37, № 7, 966-967 (англ.).
10. Лукацкая И.А. Измерение плотности пара в вакуумной дуге. ЖТФ 34, 4 (1964), 694.
11. Кесаев И.Г. Исследование устойчивости металлических вакуумных дуг, ч. I и II, ЖТФ 33, 5 (1963), 603-624.
12. Тюлина М.А. Исследование скорости распространения плазмы при размыкании тока в вакууме. ЖТФ, 36, 10 (1966), 1905.
13. Бондаренко С.Т. ЖТФ 33, 4 (1963).
14. Бричкин А.В., Болотов А.В., Борисова Т.В. К динамике электродных пятен электрической дуги. ЖТФ 36, 7 (1966), 1251.
15. Вулис Л.А., Горячев В.Л. О тепловом режиме горения электрической дуги. Инженерно-физический журнал № 2 (1967).

16. Залесский Л.М. Электрическая дуга отключения. Госэнергоиздат (1963).

17. Абрамович Л.Ю., Клярфельд Б.Н., Настич Ю.И. Сверхплотный тлеющий разряд с полым катодом. ЖТФ 36, 4, 714 (1966).

Подписи к рисункам

Рис.1. Иллюстрационный разрез конструкции вентиля.

- 1 - первый основной электрод (анод),
- 2 - каналы охлаждения,
- 3 - вывод анода,
- 4 - второй основной электрод,
- 5 - отверстия для откачки,
- 6 - резиновое уплотнение,
- 7 - защитный выступ,
- 8 - полости для охлаждения катода,
- 9 - разделительный изолятор,
- 10 - углубления в электродах,
- 11 - поджигающий электрод,
- 12 - изолятор поджигающего устройства,
- 13 - поджигающие контакты,
- 14 - поджигающие кромки отверстий в катоде.

Рис.2. Общий вид управляемого вентиля с короткой дугой.
(фото)

- а) в собранном виде,
- б) часть конструкции вентиля с анодом,
- в) часть конструкции вентиля с поджигающим устройством.

Рис.3. Кривые зависимости потенциала зажигания от начального давления газа и расстояния между электродами.

1 - $U_3 = f(pd)$	при	$d = 20$ мм
2 - $U_3 = f(pd)$	при	$d = 75$ мм
3 - $U_3 = f(pd^{0.58})$		

Рис.4. Схемы соединения электродов и вакуумной камеры.

- а - вакуумная камера под плавающим потенциалом,
- б - вакуумная камера под потенциалом катода,
- в - вакуумная камера под потенциалом анода,
- г - вакуумная камера под положительным потенциалом (~ 5 кв) по отношению к катоду,
- д - вакуумная камера под отрицательным потенциалом (~ 5 кв) по отношению к катоду.

Рис.5. Осциллограмма падения напряжения в дуге вентиля с расстоянием между электродами, изменяющимся от 10 мм в центре до 5 мм на периферии. Развертка 200 мксек/см. Чувствительность 30 в/см.

Рис.6. Осциллограммы тока (верхний луч) и давления у стенки камеры (нижний луч) при амплитуде тока $I_{\text{макс}} = 10 \text{ кА}$ и начальном давлении водорода $P_0 = 5 \cdot 10^{-2} \text{ мм.рт.ст.}$. Длительность развертки 1 мсек/см.

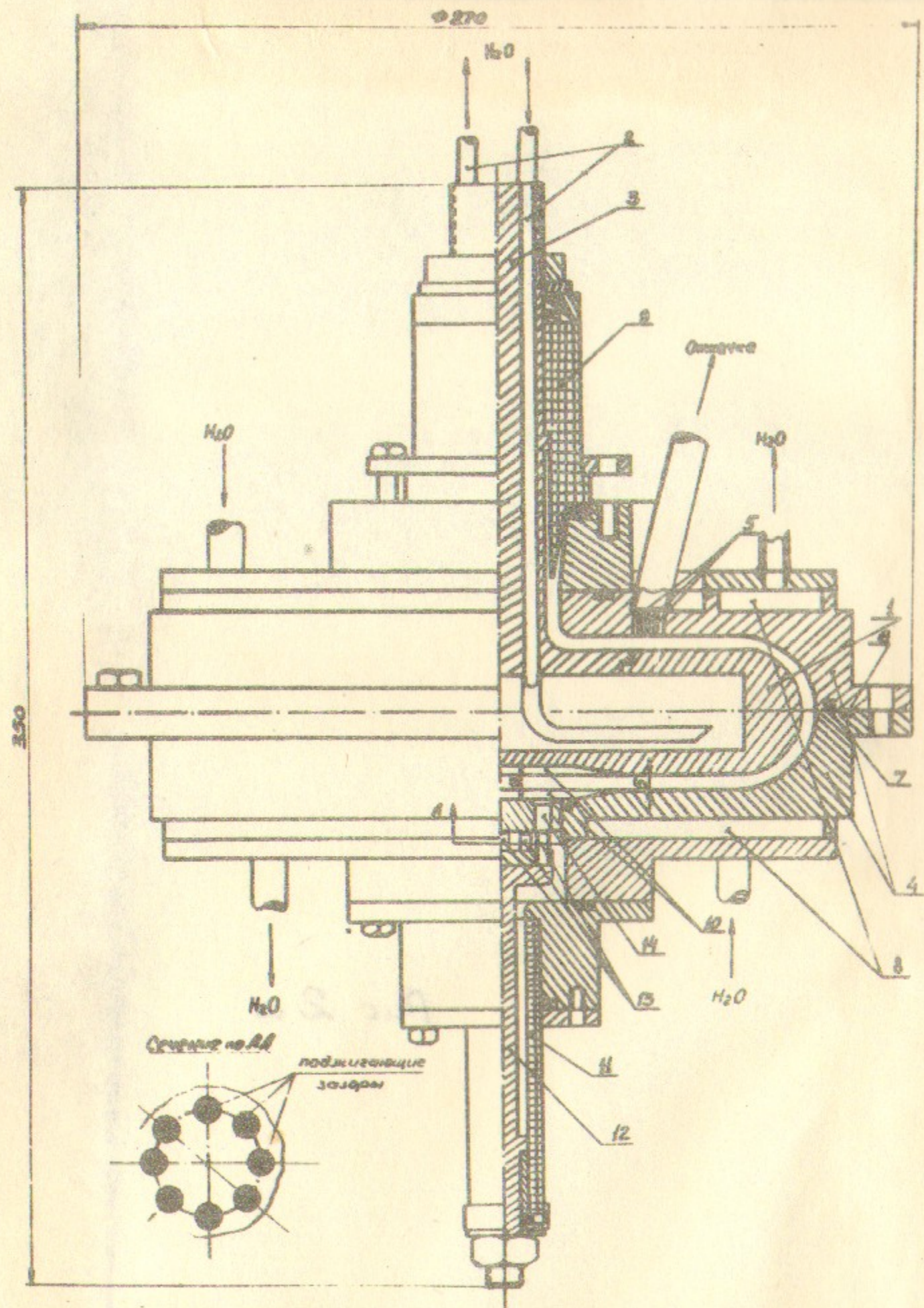


Рис. 1

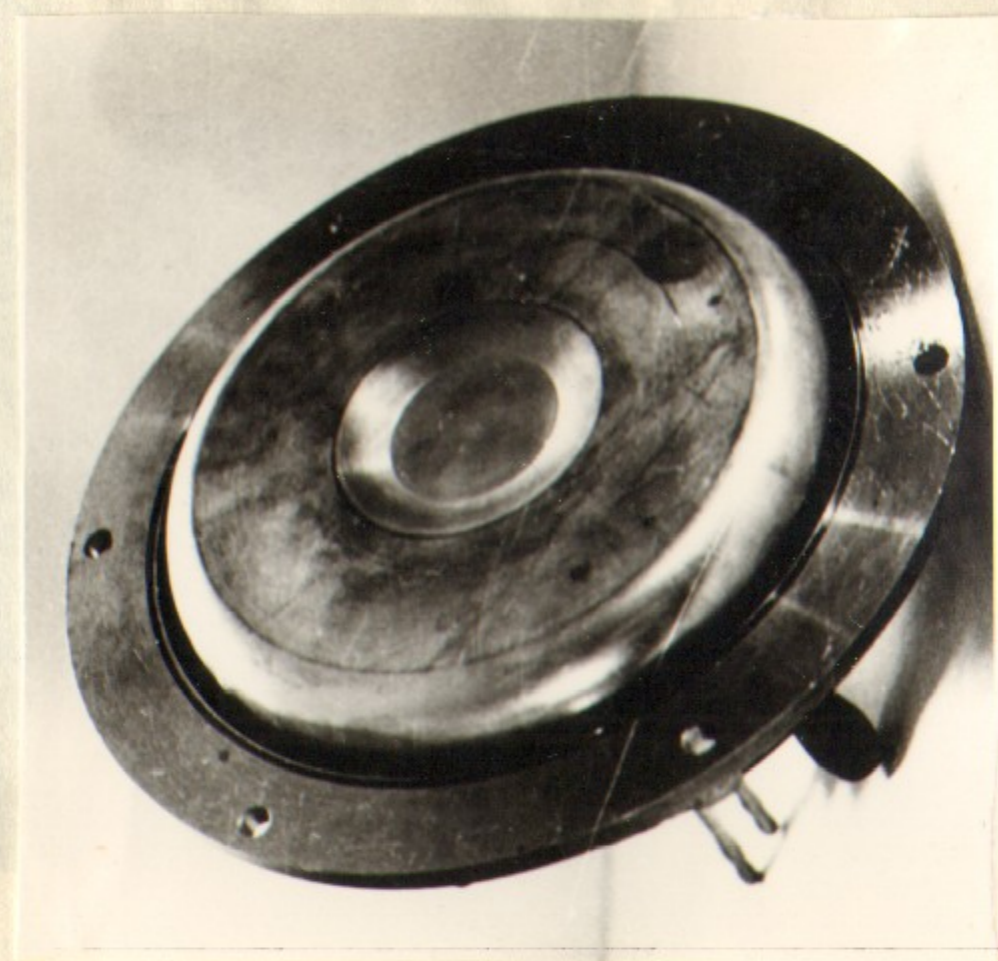
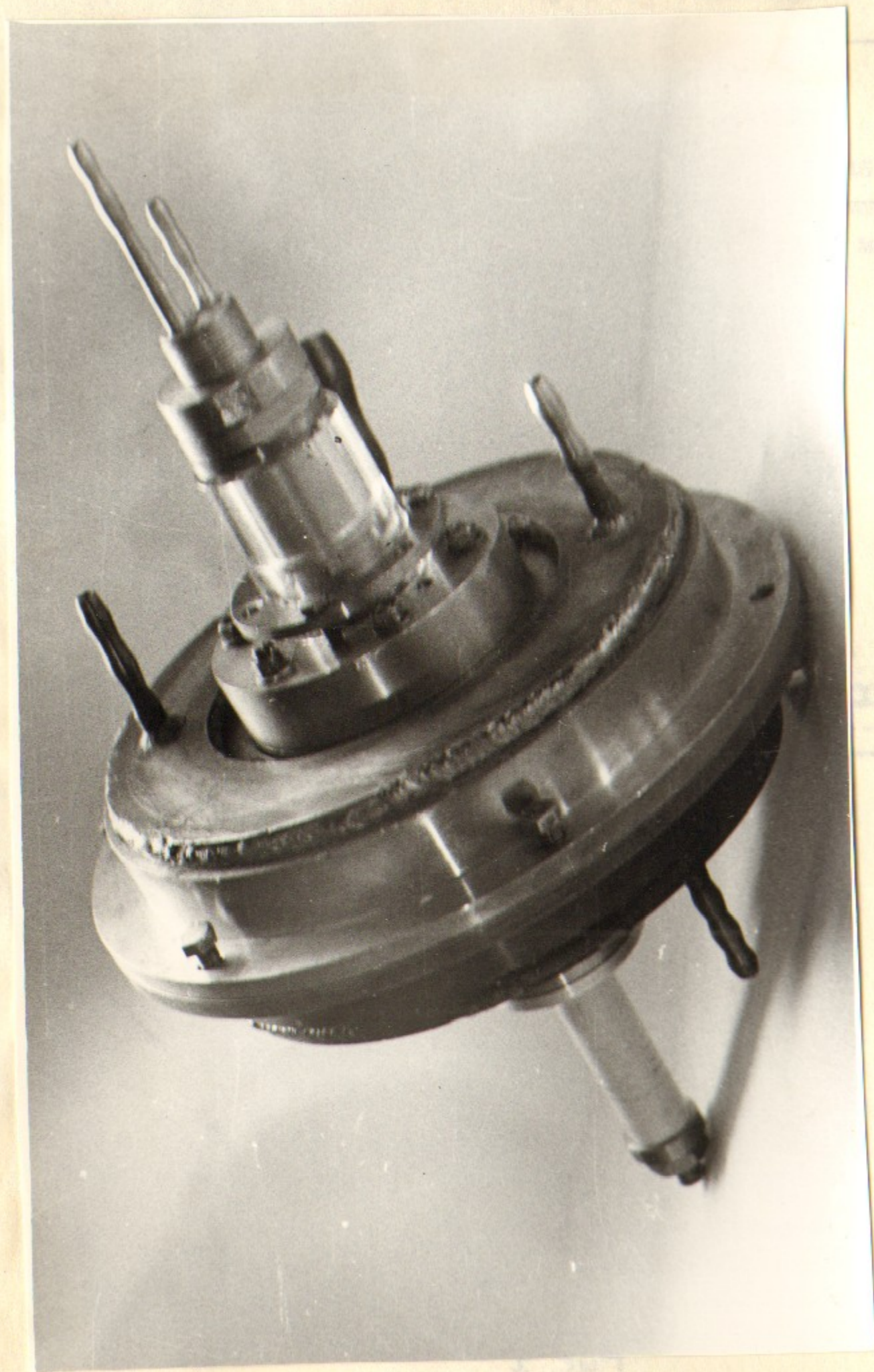
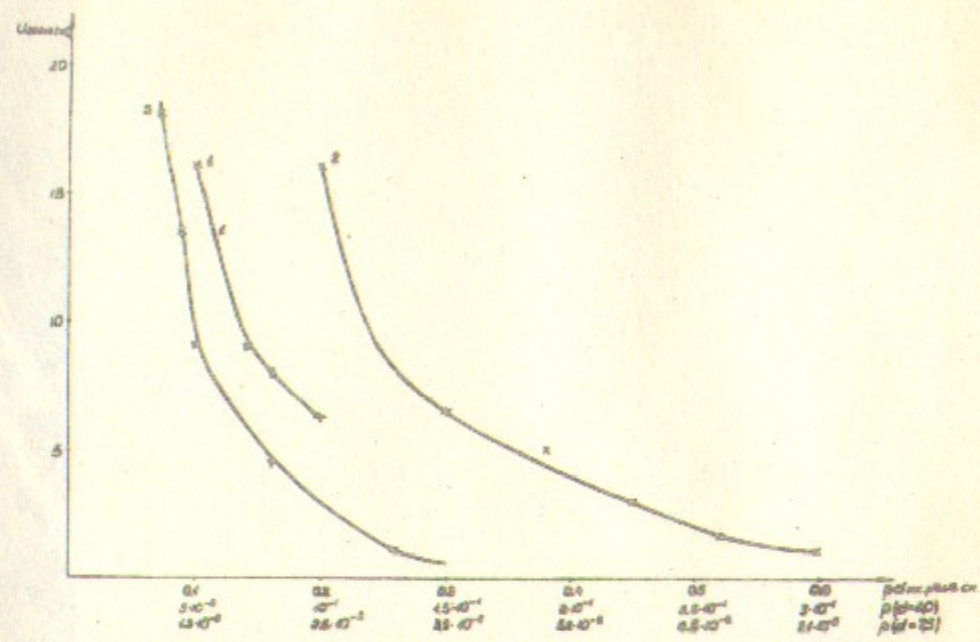


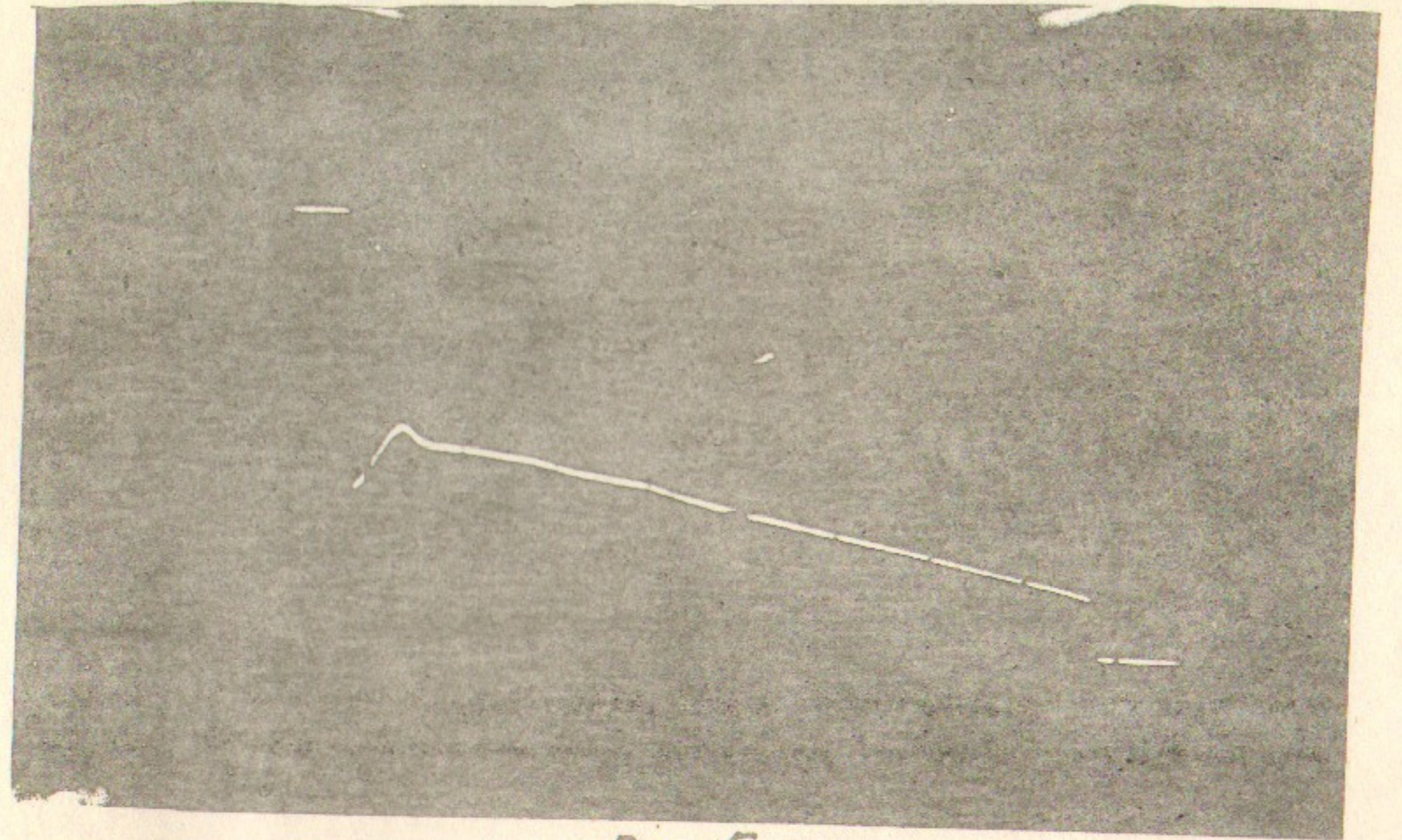
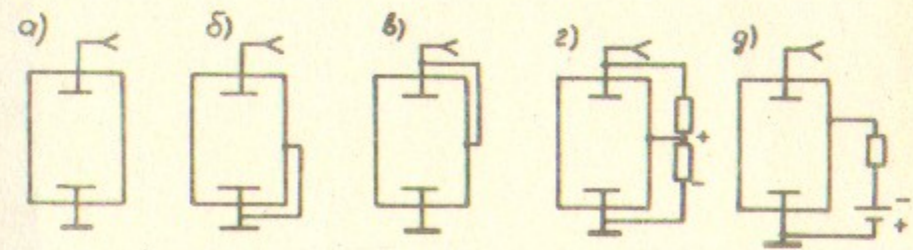
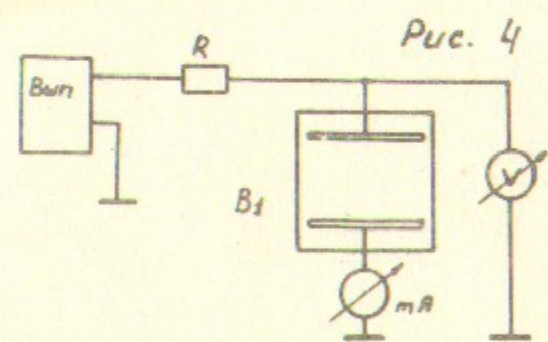
Рис 25



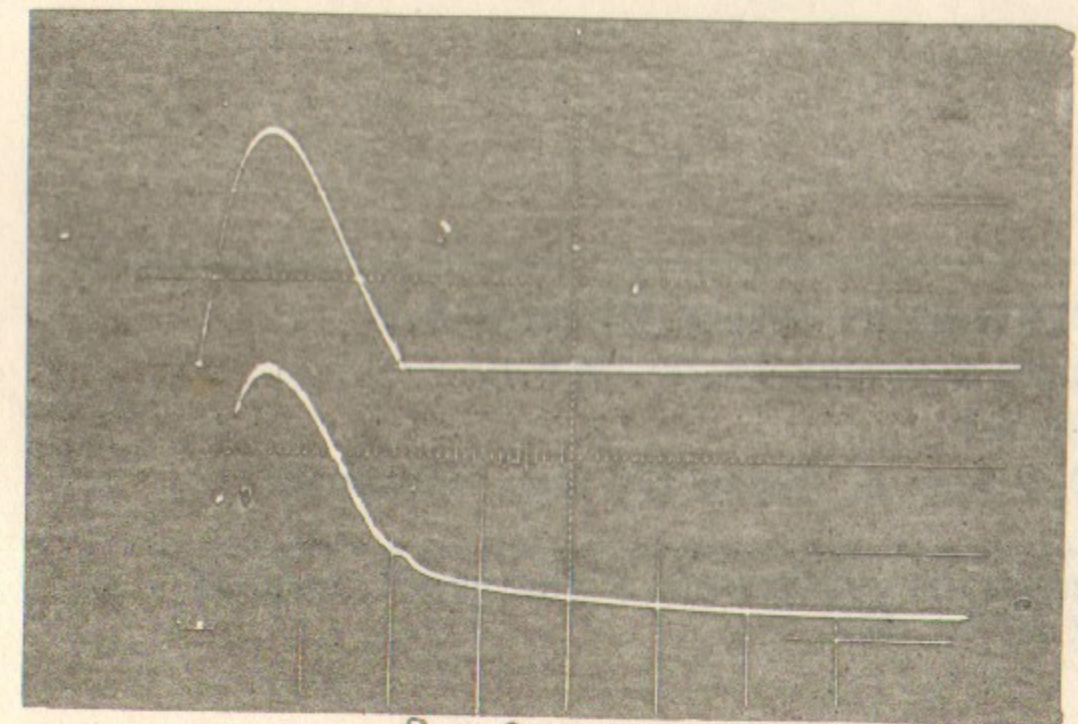
Рис 26



Puc. 3



Puc. 5



Puc. 6

Ответственный за выпуск ГЕЛЬЦЕЛЬ М.Ю.
Подписано к печати 17.УП-1967 г.
Заказ № 147
Усл. 0,8 печ. л. Тираж 120 экз. Бесплатно

Отпечатано на роталпринте в Институте ядерной
физики СО АН СССР