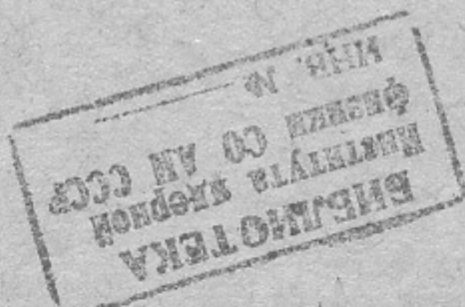


Г.И. Димов

**Быстродействующие затворы для
импульсного напуска газа в
вакуумные устройства**



г.Новосибирск 1967

17a

В связи с экспериментами по перезарядной инжекции протонов в накопители / I / для импульсных ионных источников, газовых мишеней и струй в вакууме нами разработана серия быстродействующих газовых затворов с длительностью импульсов газового потока от 10 мксек до 2 мксек.

Для получения газовых потоков длительностью от 500 мксек до 2 мксек используется электромагнитный затвор, конструкция которого представлена на рис. 15. Электромагнит затвора размещен в корпусе, в который подводится газ высокого давления. Ш-образный сердечник электромагнита и якорь изготовлены из листовой стали толщиной 0,1 мм. Центральная часть сердечника покрыта трехслойным медным экраном для уменьшения магнитных потоков рассеяния. Дюралюминиевый корпус якоря служит клапаном и своей нижней шлифованной плоскостью через тефлоновое уплотнение закрывает отверстие в вакуум. Вес якоря $\sim 1,9$ г. Размеры 12 x 12 x 2 мм³. Возврат якоря осуществляется с помощью 4-х резиновых шайб диаметром 2 мм и толщиной 1 мм, приклеенных на угловых выступах якоря. При установке якоря делается предварительное поджатие на 0,1 + 0,2 мм. Зазор между якорем и сердечником электромагнита устанавливается 0,15 до 0,5 мм. Для получения от затвора газового импульса на обмотку электромагнита (число витков ~ 300) разряжается через управляемый тиратрон конденсатор емкостью от 2 до 10 мкф, заряженный до напряжения от 200 до 400 в. При этом через обмотку проходит примерно треугольный импульс тока длительностью 0,5 + 1 мсек с амплитудой до 5 а.

Длительность импульса газового потока регулируется величиной предварительного поджатия якоря и зазора между якорем и сердечником (примерно в 2 раза) и изменением емкости и напряжения питающего конденсатора (примерно в 2 раза).

Имеющие место зависимости длительности импульса от различных параметров объясняются непостоянством упругости резиновых шайб, зависимостью силы притяжения якоря сердечником от зазора между ними, зависимостью временного закона колебательного движения якоря от длительности импульса тока, питающего электромагнит, и предварительного поджатия.

На рис. 16 представлена осциллограмма газового потока от электромагнитного клапана с дозирующим отверстием ϕ 2 мм.

Получение газовых потоков длительностью менее 500 мксек осуществляется с помощью электродинамических затворов. На рис. 16 представлен затвор для получения газового потока длительностью от 200

до 500 мксек. В корпусе, в который подводится газ высокого давления, размещена пружина из 3-х бронзовых пластинок шириной 3 мм и толщиной 0,4 мм. Пружина закреплена своими концами на металлическом основании корпуса, причем один ее конец электрически изолирован от этого основания. Зазор между пружиной и основанием 0,2 + 0,3 мм. Рабочая длина пружины 60 мм. В центре пружины через изоляцию закреплен дюралюминиевый клапан с тефлоновым наконечником весом 75 мг. Пружина поджимает клапан к отверстию в вакуум. Для открытия затвора по пружине пропускается импульс тока длительностью 200 мксек с амплитудой до 6 ка. На рис. 4 представлен аналогичный затвор для получения газового потока длительностью от 15 до 100 мксек. Пружина этого затвора из пружинной стали шириной 2 мм, толщиной 1 мм и рабочей длиной 32 мм. Через этот затвор пропускается импульс тока длительностью 50 мксек с амплитудой до 10 ка. На рис. 5 представлены осциллограммы газового потока, полученного с помощью этого затвора с дозирующим отверстием \varnothing 0,1 мм при различных амплитудах тока. В варианте с удлиненным клапаном, изображенном на рис. 4, корпус клапана выполняется из инвара для уменьшения температурного удлинения. Вес клапана в этом случае около 0,5 г. и примерно равен весу пружины. Питание электродинамических затворов (рис. 3, 4) производится от конденсаторов типа МБГО общей емкостью до 1600 мкф с напряжением до 400 в с помощью ignитрона И-20/1,5, позволяющего коммутировать достаточно надежно импульсные токи до 15 ка длительностью до 200 мксек с частотой до 1 гц.

На рис. 29 представлен наиболее быстродействующий электродинамический затвор с временем открытия клапана 10 + 30 мксек. В этом затворе пружиной служит бронзовая мембрана диаметром 12 мм и толщиной 0,2 мм. Мембрана одновременно является клапаном. Мембрана установлена на изолированном основании, представляющем медную пластинку сечением 3 x 6 мм² с отверстием в вакуум. При открытии клапана по медной пластинке пропускается импульс тока длительностью 20 мксек и амплитудой до 30 ка.

При работе электродинамических затворов наблюдалось повторное открывание клапана, как это показано на рис. 29. Повторные открывания клапана уменьшаются с увеличением предварительного прогиба пружины. Эффективным путем борьбы с повторными открываниями клапана, как показал опыт, является применение многослойных пружин, в которых трение между пластинами приводит к быстрому затуханию колебания пружины, а также применение специальных демпферов. При испытаниях затворов с пружиной в виде однослойного бруса длиной более

50 мм наблюдалось возбуждение высших мод колебаний, превосходящих по амплитуде основную моду. Возбуждение высших мод связано с неравномерностью электродинамического давления по длине пружины, с наличием посредине бруса клапана, с неравномерным нагревом пружины по толщине. Возбуждение высших мод усиливалось при питании затвора импульсом тока длительностью, меньшей полупериода собственных колебаний. Применение многослойных пружин позволило ~~избавиться также и от возбуждения~~ *значительно* высших мод.

Длительность выпуска газа затвором τ в основном определяется полупериодом собственных колебаний клапана с пружиной T . Клапан выгодно и можно изготовить значительно легче пружины и его массой можно пренебречь. Для n -слойного бруса с заземленными концами общей толщиной c и длиной l

$$T = 0,484 \frac{nl^2}{c} \sqrt{\frac{\gamma}{E}};$$

где γ - плотность, E - модуль Юнга.

Для жесткой мембраны с глухой заделкой толщиной c и диаметром d

$$T = \frac{d^2}{4c} \sqrt{\frac{\gamma}{E}}$$

Для гибкой мембраны полупериод T зависит от ее предварительного прогиба h_0 и амплитуды отхода клапана h

$$T = \begin{cases} \frac{d^2}{3h} \sqrt{\frac{\gamma}{E}} & \text{при } h \gg h_0; \\ \frac{d^2}{6h_0} \sqrt{\frac{\gamma}{E}} & \text{при } h \ll h_0. \end{cases}$$

Для хлопающей мембраны полное время схлопывания близко к полупериоду колебаний жесткой мембраны. Если отход такой мембраны h значительно больше прогиба схлопывания h_* , то полупериод ее колебаний

$$T \approx \frac{1}{3} \frac{d^2}{h-h_*} \sqrt{\frac{\gamma}{E}} \frac{h}{h-h_*}.$$

Для бруса и жесткой мембраны длительность τ также зависит от предварительного прогиба. При длительности импульса тока через пружину, равной полупериоду собственных колебаний

$$\frac{\tau}{T} \approx \frac{2}{\pi} \arccos \frac{h_0}{h+h_0}.$$

Выбирая соответствующие размеры пружины можно в принципе получить любую длительность τ . Однако с уменьшением τ возрастает плотность тока, пропускаемого по пружине для ее отвода, усиливается ее нагрев, а также уменьшается ограничиваемый пределом упругости материала пружины отход клапана. Ток по пружине определяется необходимым давлением на нее

$$p = \alpha \frac{\delta c}{\pi^2} (\beta h + h_0).$$

Допустимый отход пружины

$$h + h_0 \leq k T \frac{\sigma}{\sqrt{\gamma E}};$$

где σ - предел упругости.

Для бруса $\alpha = \pi^2$; $\beta = 0,5$; $k = 0,13$.

Для жесткой мембраны ($h_0 + h < c$) $\alpha \approx 5,9$; $\beta = 0,5$; $k \approx 0,23$.

Для гибкой мембраны ($h_0 + h > c$) при $h \gg h_0$ $\alpha \approx 6,2$; $\beta = 0,25$; $k = 0,185$

Для хлопающей мембраны при $h \gg h_0$ значения α, β, k близки к их значениям для гибкой мембраны. Для нормальной хлопающей мембраны величина k значительно меньше его значения для гибкой мембраны. Значения динамических коэффициентов β приведены для прямоугольных импульсов давления. По величине необходимого электродинамического давления наиболее выгодна гибкая мембрана, по допустимому отходу пружины наиболее выгодна жесткая мембрана. Наиболее подходящими материалами для пружин является сталь У8А или 65Г, бронза БрБ-2 и дюралюминий В95 или Д16Т. У стали наибольшее значение величины $\frac{\sigma}{\sqrt{\gamma E}} = 4,15 \cdot 10^3 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$, стальные пружины дают максимальный отход клапана. Для пружины из дюралюминия требуется наименьший ток. Бронза по допустимому прогибу и необходимому давлению для изгиба близка к стали, но нагрев ее из-за хорошей проводимости значительно меньше.

Для открытия клапана пропускается ток по пружине или основанию клапана. При этом магнитное поле тока должно быть сосредоточено в основном в зазоре между пружинной и основанием. Для этого ширина пружины или основания должна быть значительно больше зазора с учетом скин-слоев и должно быть обеспечено малое сопротивление для обратного магнитного потока. С увеличением ширины пружины или основания возрастает величина необходимого тока. Электродинамическое давление на пружину пропорционально квадрату поверхностной плотности тока. С целью уменьшения необходимого тока и нагре-

ва пружины можно использовать внешнее магнитное поле. В этом случае давление на пружину увеличивается в $1 + 1,6 H/j$ раз, где H - внешнее поле /э/, j - поверхностная плотность тока в пружине /а/см²/. Часто в экспериментальных условиях внешнее магнитное поле имеется. Для более эффективного воздействия на пружину длительность тока через пружину должна быть равна полупериоду собственных колебаний пружины. При уменьшении длительности тока можно сократить до 50 % время τ , однако при этом возрастает необходимая амплитуда и усиливается возбуждение высших мод колебаний. При повышении длительности тока несколько возрастает время τ и повышается нагрев пружины.

Нагрев пружины зависит от режима работы и от наличия внешнего магнитного поля. При работе одиночными импульсами нагрев пружины

$\theta \cong \alpha \beta \rho \gamma \frac{h}{\tau}$ при $H=0$; ~~$\theta \cong \alpha \beta^2 \rho \gamma^2 \frac{h^2}{\tau^3}$ при $H \gg j$~~
 ~~$\theta^2 \cong \alpha^2 \beta^2 \rho \gamma^2 \frac{h^2}{\tau^2}$~~

При непрерывной работе со значительной частотой

при $H=0$ $\theta \cong \beta \rho^2 \sqrt{\gamma E} \frac{h}{\tau}$;

при $H \gg j$ $\theta \cong \alpha \beta^2 \rho^2 \gamma \sqrt{\gamma E} \frac{h^2 \tau}{\tau^3 \tau}$.

(для гибкой мембраны c заменяется на h).

Из приведенных соотношений следует, что нагрев мембран, особенно гибкой, в некоторых случаях значительно меньше нагрева однослойного бруса. При непрерывной работе нагрев обратно пропорционален числу слоев пружины. В некоторых случаях нагрев зависит от соотношения между толщиной и длиной (диаметром) пружины. Нагрев очень сильно зависит от материала пружины. ~~(нагрев стали в непрерывном режиме в 50 - 100 раз больше нагрева бронзы и дюралюминия).~~

Кроме металлических пружин для возврата клапана можно использовать давление газа над клапаном /3,5/ и резиновые амортизаторы [4]. В этих случаях величина $\alpha \beta \sim 10 + 20$. Отход клапана при использовании давления газа ограничивается только нагревом.

Практически при работе одиночными импульсами $h \leq 10^5 c \tau$.

Это значение на порядок выше допустимого при использовании металлических пружин. Однако при непрерывной работе это преимущество возврата клапана давлением газа теряется. Допустимый отход клапана при использовании резиновых амортизаторов связан со скоростью звука в резине и не превышает значение $\sim 10^3 \tau$.

Наряду с быстродействием затвора важное значение имеет количество выпускаемого за импульс газа N

Поток газа $N \sim \pi a h n_0 v_* \tau$

где a - диаметр клапана

n_0 - плотность газа в корпусе затвора

v_* - зависит от рода газа и температуры.

(Для водорода при нормальной температуре $v_* = 0,76 \cdot 10^5 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$).

Поскольку $h \cong \tau$, $N \cong \tau^2$.

Таким образом, с уменьшением длительности работы затвора сильно падает количество выпускаемого газа. Величины a и n_0 ограничены допускаемой силой давления газа на клапан. Поскольку эта сила пропорциональна $a^2 n_0$, выгодно с целью повышения N использовать высокое давление газа для питания затвора. ~~Мы использовали газ с давлением до 150 ата.~~ С целью стабилизации газового потока можно выпускать газ через дозирующее отверстие под клапаном с сечением менее $\pi a h$. При этом время вытекания газа из-под клапана через дозирующее отверстие должно быть много меньше времени работы затвора τ . Как следует из анализа работы электродинамических затворов наряду с длительностью импульса основной характеристикой затвора следует считать отношение $\frac{N}{\tau^2} \cong \frac{h}{\tau}$. Для описанных нами электродинамических затворов максимальное значение $\frac{N}{\tau^2} \sim 10^{27} \div 10^{28} \frac{\text{мол. H}_2}{\text{сек}^2}$.

~~В заключение автор считает своим приятным долгом выразить благодарность механику Журавлеву П. А. за изготовление затворов.~~

Описанные быстродействующие затворы используются не только для выноса газовых импульсов в вакуум. В ЦФ СО АН СССР они применяются также для импульсного ионного газа в ионных источниках, плазменном ускорителе и в сверхтонких разрядниках. Эффективные импульсных затворов в ряде физических исследований в термических и сверхзвуковых сетях показала их высокую надежность.

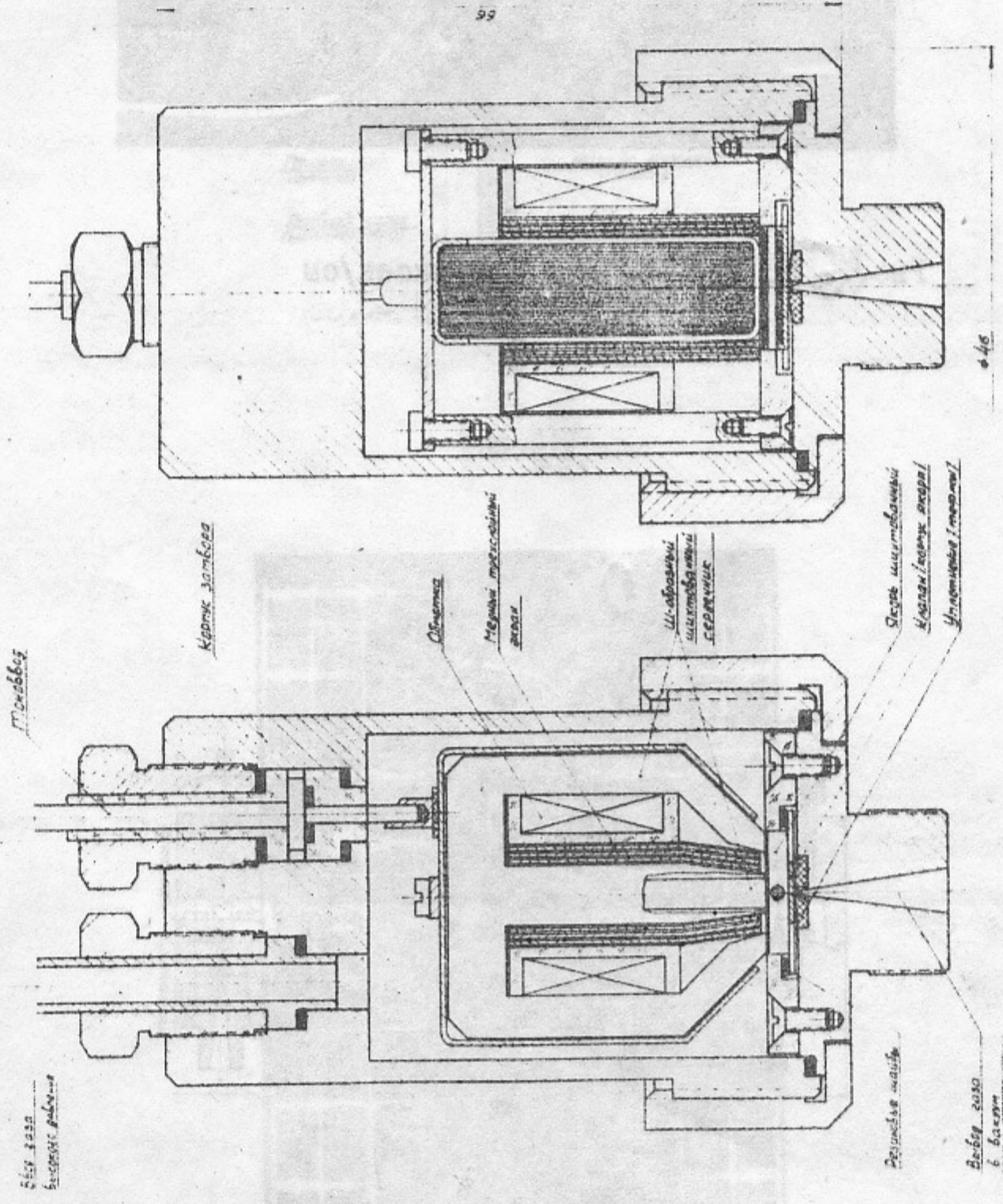


Рис. 15

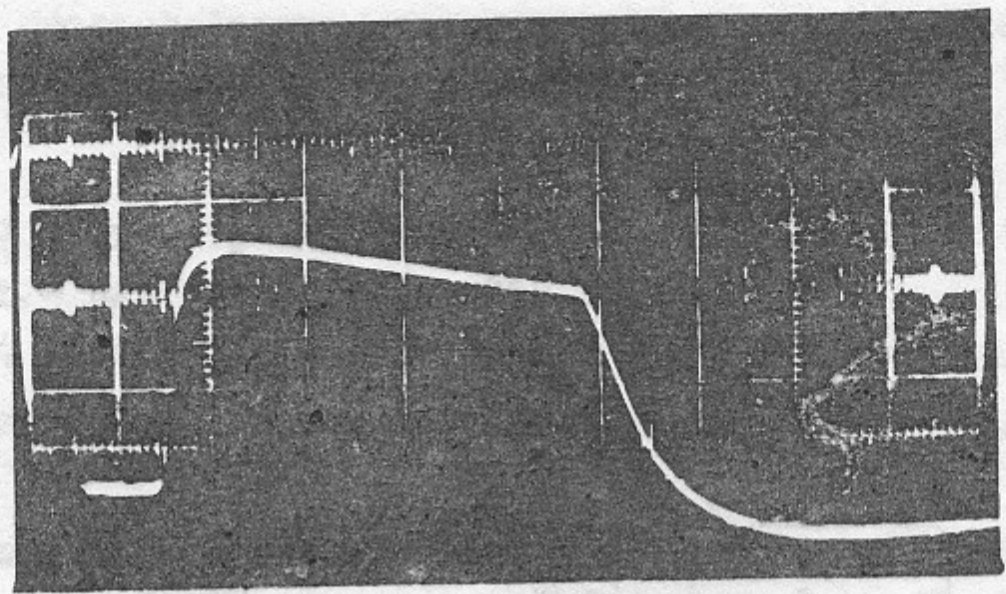


Рис. 15 По горизонтали 250 мксек/см

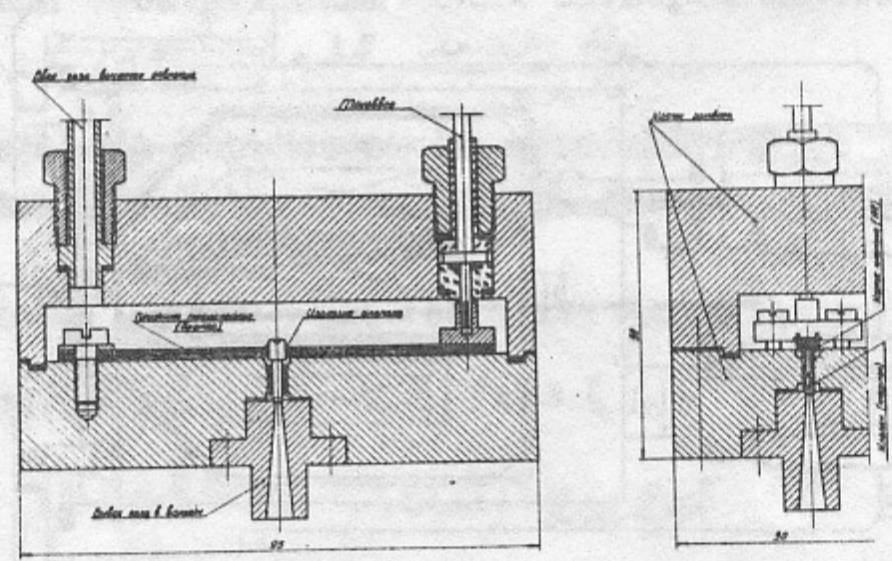


Рис. 17

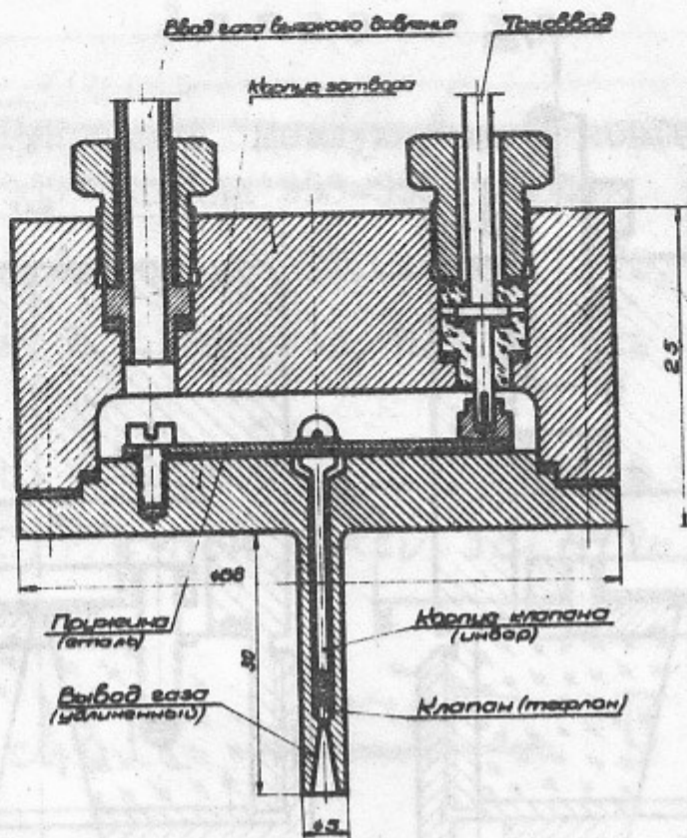


Рис. 18

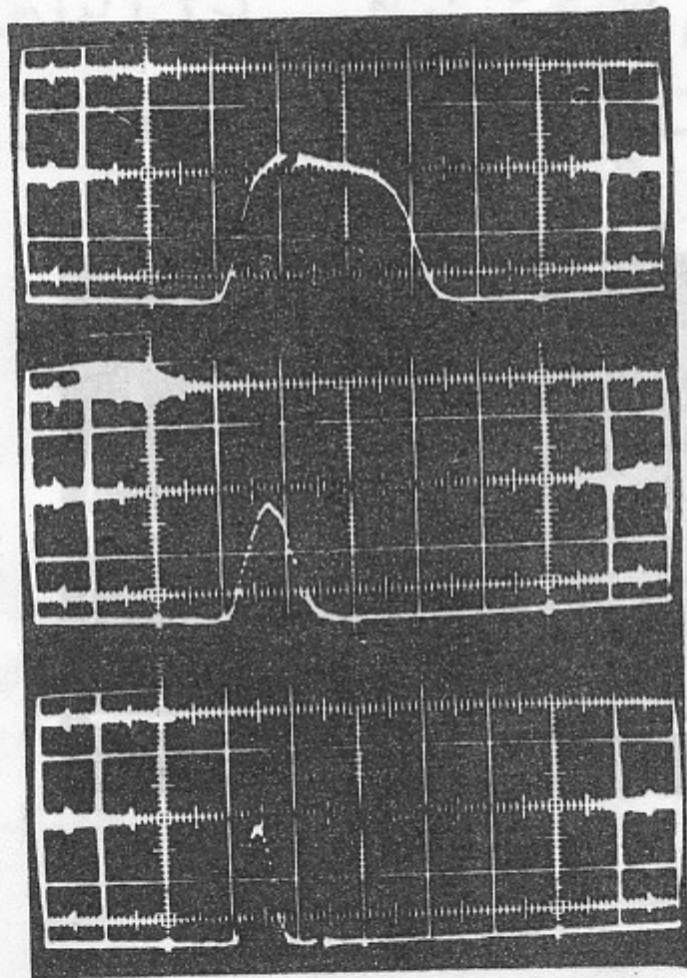


Рис. 19 По горизонтали 20 мксек/см.

Л и т е р а т у р а

1. Г.И. Будкер, Г.И. Димов "Международная конференция по ускорителям, Дубна 1963" Москва 993-996, 1964.
2. Г.Я. Умаров, А.К. Алимов, Н.Ф. Овечкин ПТЭ, 1961, № 1 178 - 179.
3. Э.Д. Андрухина, А.Я. Сафронов, И.С. Шпигель ПТЭ, 1961, № 1 174 - 177.
4. Е.Т. Кучеренко, А.С. Попович ПТЭ, 1963, № 5, 165 - 166.
5. R.S. Lowder, F.C. Hoh, "Rev. Sci. Instr.", V. 35, 1236-1238, 1962.

I. Marschall, ~~Физика~~ ^{Проблема} II международной конференции по мировому использованию атомной энергии, Машева, 1958.
Том 31, стр 34.

B. Gorowitz, K. Moses, R. Gloersen,
Rev. Sci. Instr., 31, 146 (~~1960~~) - 148 (1960)

Отпечатано на территории в Москве Т.А. Давид
Подписано к печати 11.12.1967 г.
Уч. 0,7 пер. в., тираж 500 экз. Бюджетно.
Знак 5 114

Отпечатано на территории в Москве Т.А. Давид

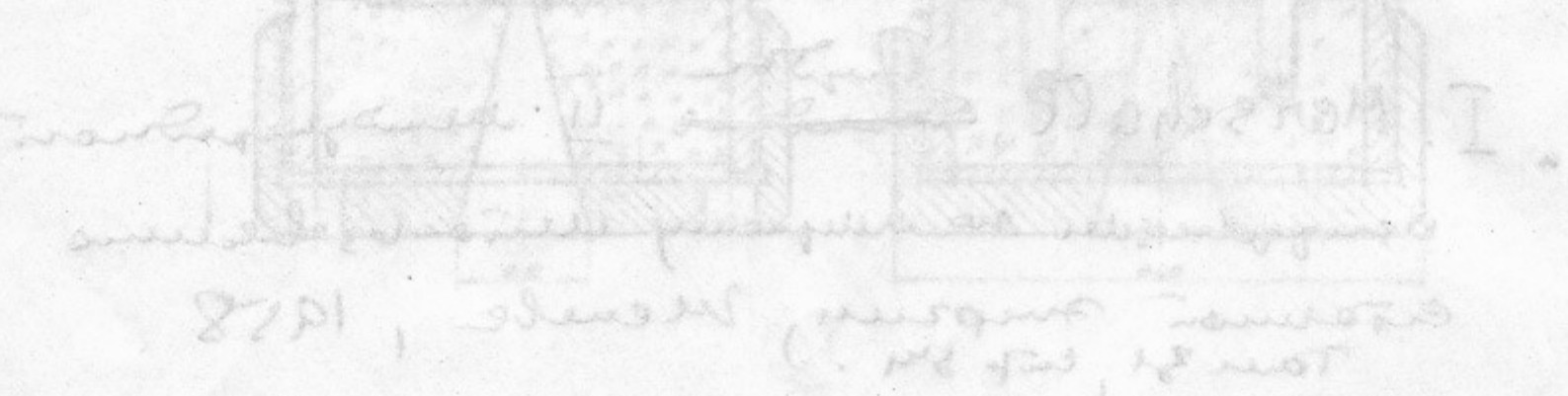
1. Т.И. Димов, Г.И. Димов, "Векторный анализ в теории..."

2. Т.И. Димов, Г.И. Димов, "Векторный анализ в теории..."

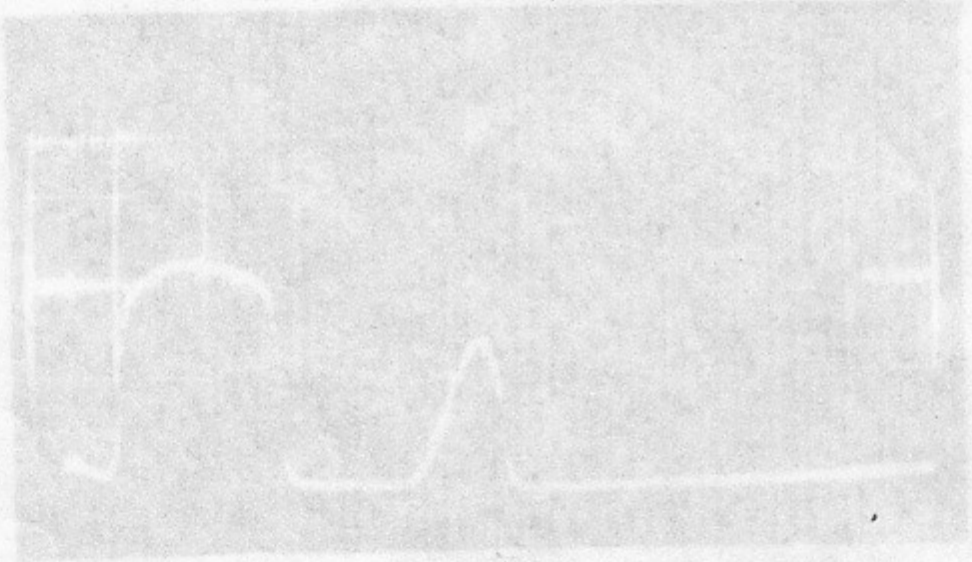
3. Т.И. Димов, Г.И. Димов, "Векторный анализ в теории..."

4. Т.И. Димов, Г.И. Димов, "Векторный анализ в теории..."

5. Т.И. Димов, Г.И. Димов, "Векторный анализ в теории..."



В. Г. Грозомитс, К. Мосов, Р. Грозомитс,
 Кав. Sci. Inst., 2, 115 (1960) - 118 (1960)



Ответственный за выпуск Г.И. Димов
 Подписано к печати II.IV-1967 г.
 Усл. 0,3 печ. л., тираж 200 экз. Бесплатно.
 Заказ № II4

Отпечатано на роталпринте в ИЯФ СО АН СССР