

СЭЧСН  
А-465

1429/2-77

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА

18/IV-77



P9 - 10278

В.С.Александров, В.Г.Новиков, Э.П.Павлов,  
В.Д.Перминов, Б.А.Шестаков

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ГАЗОВЫЙ КЛАПАН

**1976**

P9 - 10278

В.С.Александров, В.Г.Новиков, Э.П.Павлов,  
В.Д.Перминов, Б.А.Шестаков

**БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ГАЗОВЫЙ КЛАПАН**

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Александров В.С., Новиков В.Г., Павлов Э.П.,  
Перминов В.Д., Шестаков Б.А.

P9 - 10278

#### Быстродействующий газовый клапан

Описываются конструкция и результаты испытаний быстродействующего газового клапана с улучшенными характеристиками. Получены импульсные газовые струи длительностью до 30 мкс. Частота срабатываний клапана - до 20 раз в секунду.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований  
Дубна 1976

Alexandrov V.S., Novikov V.G.,  
Pavlov E.P., Perminov V.D.,  
Shestakov B.A.

P9 - 10278

#### Fastacting Gaseous Valve

The construction and results of the investigations of fastacting gaseous valve with the improved characteristics are described. Pulsed gaseous beams with the duration of up to 30 mks have been obtained. Acting valve frequency is up to 20 times per second.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research  
Dubna 1976

© 1976 Объединенный институт ядерных исследований Дубна

В ряде работ <sup>/1-3/</sup>, посвященных развитию коллективного метода ускорения, рассматриваются различные методы загрузки электронных колец ионами выбранного для ускорения химического элемента. Технически наиболее просто создать в окружающем кольцо пространстве избыток атомов или молекул этого элемента. При этом происходит частичный захват их за счет ионизации при соударении с электронами кольца в процессе его сжатия <sup>/1/</sup>. Однако предпочтительнее быстрая загрузка ионами предварительно сжатого кольца, осуществляемая за время в несколько десятков микросекунд, т.к. при этом количество захваченных кольцом ионов легко регулируется, в кольце отсутствуют ионы с малыми зарядностями и дисперсия ионов по зарядности сводится к минимуму <sup>/2/</sup>.

В настоящей работе описан импульсный электродинамический клапан /ЭДК/ газодинамического источника нейтральных атомов /ГДИ/, предназначенного для быстрой загрузки ионами любого газа /в т.ч. и тяжелого, например, ксенона/ электронных колец коллективного ускорителя тяжелых ионов ОНМУ ОИЯИ <sup>/4/</sup>, и приведены данные, полученные при испытаниях ЭДК на стенде.

#### Электродинамический клапан /ЭДК/

Принцип действия ЭДК, подобный описываемому в данной работе, достаточно хорошо известен <sup>/5-7/</sup>. Однако перед авторами стояла задача максимально увеличить быстродействие клапана /при заданной частоте срабатывания/ и, таким образом, получить предельно короткие пакеты атомов газа. Поэтому был проведен анализ рабо-

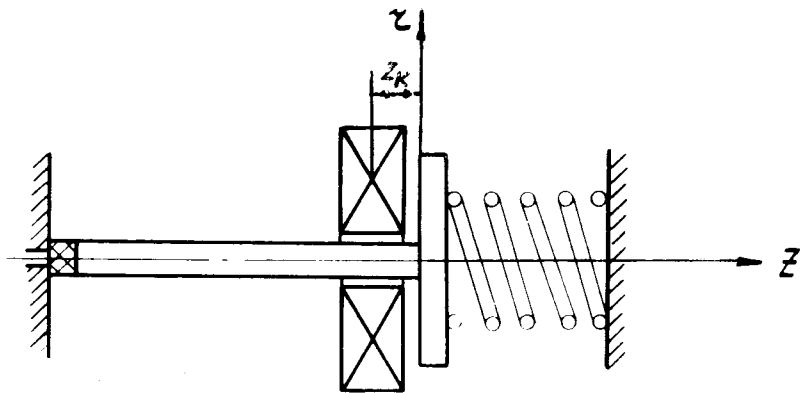


Рис. 1. Упрощенная схема клапана для расчета его параметров. Начало координат соответствует положению диска, поджатого пружиной.

ты клапана и его традиционная конструкция подвергалась изменениям. При анализе полагалось, что в магнитную катушку клапана подаются импульсы тока в виде отдельных полуволн синусоиды с амплитудой  $J_m$  и круговой частотой  $\omega$ .

При пропускании через катушку импульса тока  $I(t) = I_m \sin \omega t$  в металлическом диске, который жестко соединен со штоком, запирающим отверстие для напуска газа /см. рис. 1/, возникают наведенные токи с распределением  $j(r, z, t)$ . Взаимодействие этих токов с радиальной составляющей магнитного поля катушки  $H_r(r, z, t)$  приводит к возникновению действующей на диск радиуса  $a$  ponderomotorной силы

$$F_{\Theta}(a, z_k, t) = \frac{1}{c} \int_0^a \int_{z_k}^{z_k+h} j(r', z', t) \cdot H(r', z', t) \cdot 2\pi r' dr' dz',$$

где  $z_k$  - расстояние между центром катушки и диском,  $h$  - толщина диска.

Выражение для силы можно упростить, если считать, что наведенный ток сосредоточен в диске на глубине, равной половине скин-слоя  $\delta$ , и что выполнены условия

$$\frac{\partial H_z(r, z_k, t)}{\partial z} \cdot \Delta z \ll H_z(r, z_k, t),$$

$$\frac{\partial H_r(r, z_k, t)}{\partial z} \cdot \Delta z \ll H_r(r, z_k, t)$$

$\Delta z$  - максимальное отклонение диска от начального положения/. Тогда, введя обозначения  $j^*(r, t) = \delta \cdot j(r, z_k + \frac{\delta}{2}, t)$ ,

$$H_r^*(r, t) = H_r(r, z_k + \frac{\delta}{2}, t), \text{ получим } F_{\Theta}(a, t) = \frac{2\pi}{c} \int_0^a j^*(r', t) \cdot H_r^*(r', t) r' dr'.$$

Диск со штоком, запирающим клапан, удерживается пружиной с коэффициентом жесткости  $k$ , которая до подачи импульса тока в катушку клапана поджата на величину  $z_0$ . На диск со стороны пружины действует сила  $F_{\Pi} = k(z + z_0 - h)$ . Если диск со штоком имеют суммарную массу  $m$ , то уравнения их движения /масса пружины не учитывается/ можно представить в следующем виде:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = 0 \quad \text{при } t \leq \tau_0,$$

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{1}{m} (F_{\Theta} - F_{\Pi}) \quad \text{при } t > \tau_0,$$

где  $\tau_0$  - момент времени, когда  $F_{\Theta}(\tau_0) = kz_0$ ,  $F'_{\Theta}(\tau_0) > 0$ . Распределение плотности тока  $j^*(r, t)$ , необходимое для определения электродинамической силы  $F$ , можно найти, рассматривая диск как  $n$  концентрических витков с радиальной толщиной  $\Delta r$  и решая численно систему уравнений для элементарных токов  $I_i$ :

$$L_i \dot{I}_i + \sum_{j \neq i}^n M_{ij} \dot{I}_j + R_i I_i = M_i \omega I_m \cos \omega t,$$

где  $L_i$  и  $R_i$  - индуктивность и омическое сопротивление  $i$ -того витка,  $M_{ij}$  - взаимная индуктивность  $i$ -того и  $j$ -того витков, а  $M_i$  - взаимная индуктивность катушки и  $i$ -того витка. Зная зависимость  $j^*(r, t)$ , легко определить силу  $F_\Theta(t)$ , а с ней и перемещение  $z(t)$ .

Расчеты по определению величин  $j^*(r, t)$ ,  $H_r^*(r, t)$ ,  $F_\Theta(t)$  и  $z(t)$  для дисков различных радиусов и с различной проводимостью проводились на ЭВМ. При этом принималось во внимание, что радиус диска не должен превышать величины 2 см, определяемой габаритами установки.

На рис. 2 приведены типичные радиальные распределения и временные зависимости плотности наведенных токов для алюминиевого диска радиусом  $a=2$  см и двухрядной 8-витковой катушки со средним радиусом  $r_k = 1,5$  см. Радиальное распределение тока в диске имеет "колебательный" характер, связанный с тем, что расстояние от диска до катушки сравнимо с расстоянием между ее витками.

Для нескольких алюминиевых и медных дисков были определены величины скорости, приобретаемой за счет

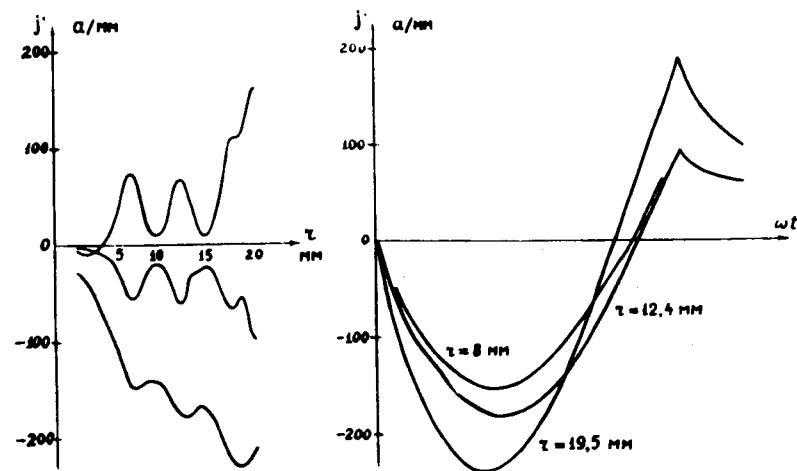


Рис. 2. Радиальные распределения и временные зависимости плотности наведенных токов в диске клапана.

Таблица 1

Материал	h, мм	$V_{изм.}, м/с$	$V_{расч.}, м/с$
Дюралюминий	1,46	4,4	4,2
	2,9	2,8	2,1
Медь	1,14	2,5	2,3
	2,28	1,3	1,15

электродинамического взаимодействия с полем катушки клапана:

$$V_0 = \frac{1}{m} \int_0^{\pi/\omega} F_\Theta(t) dt.$$

Экспериментально скорости определялись по высоте "подскока" дисков, помещенных на катушку, которая располагалась горизонтально.

В табл. 1 приведены некоторые результаты расчетов и измерений скоростей для дюралюминиевых и медных дисков радиусом  $a=2$  см. Видно, что результаты измерений хорошо согласуются с расчетами.

Сравнительный анализ результатов позволил выбрать конфигурацию и число витков катушки, а также размеры и материал диска, обеспечивающие наибольшую скорость перемещения подвижного элемента клапана под действием электродинамической силы при заданных величинах тока  $I_m$ , частоты  $\omega$  и напряжения на катушке  $U_m$ . Параметры приведены далее в тексте.

Поскольку часть прямого хода и весь обратный ход штока клапана происходят под действием только упругой силы пружины, то при фиксированной величине хода штока время открытия обратно пропорционально корню квадратному из величины жесткости пружины. Поэтому в известных ЭДК увеличение быстродействия при прочих равных условиях обеспечивалось увеличением жесткости пружины и ее начального поджатия при одновременном увеличении силы  $F_\Theta$ .

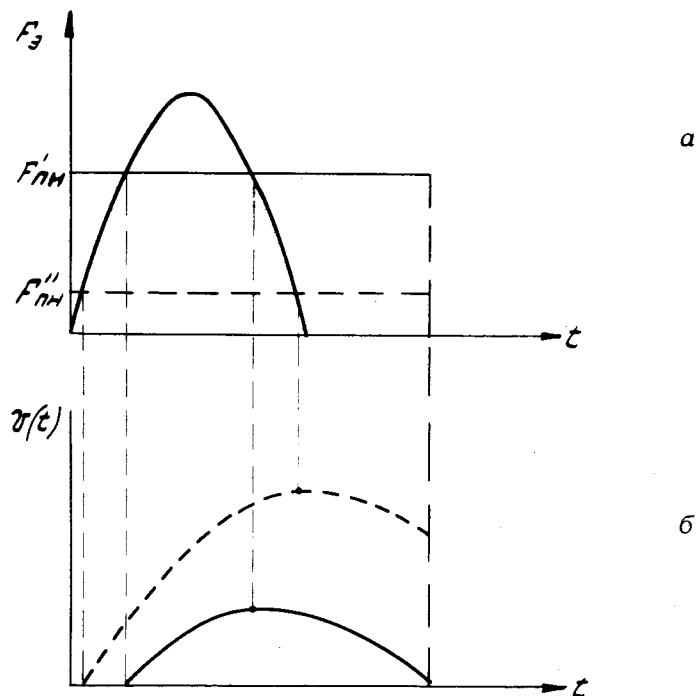


Рис. 3. Качественные зависимости электродинамической силы /а/ и скорости движения штока /б/ для слабой /пунктирная линия/ и сильной /сплошная линия/ пружины от времени.  $F''_{пн}$  и  $F'_{пн}$  - сила начального поджатия сильной и слабой пружины соответственно.

В настоящей работе предлагается другой способ увеличения быстродействия клапана, суть которого становится ясной из рассмотрения качественных зависимостей скорости движения штока от времени для слабой и сильной пружин, показанных на рис. 3 /пунктирной и сплошной линиями соответственно/; там же представлена зависимость  $F_э(t)$ . Очевидно, что шток со слабой пружиной пройдет фиксированное расстояние быстрее, чем шток с сильной пружиной. Если теперь в конце фиксированного хода штока установить массивный упругий отражатель, то время обратного хода штока при слабой пружине будет меньше, чем при жесткой.

Дальнейшее сокращение времени, в течение которого ЭДК открыт, было сделано за счет модернизации его запирающего элемента. На конец штока, запирающий сопло, прикрепляется упругий наконечник /например, из мягкой резины/. Такой запирающий элемент позволяет держать отверстие клапана закрытым вплоть до момента достижения штоком максимальной скорости, т.к. в начале работы клапана движение штока идет на восстановление недеформированного состояния резины. Таким образом, введение отражателя из жесткого и упругого материала /например, титана/ и упругого элемента, запирающего сопло, позволяет значительно увеличить быстродействие клапана и избежать при этом применения в его электро-схеме слишком мощных и дорогостоящих коммутаторов тока.

Схематическое изображение ЭДК приведено на рис. 4. Клапан состоит из корпуса 1, служащего одновременно форкамерой газодинамического источника, с соплом 2. В корпусе помещается двухрядная плоская 8-витковая катушка 3 с пропущенным сквозь нее дюралюминиевым штоком 4. На штоке закреплены резиновое уплотнение 5,

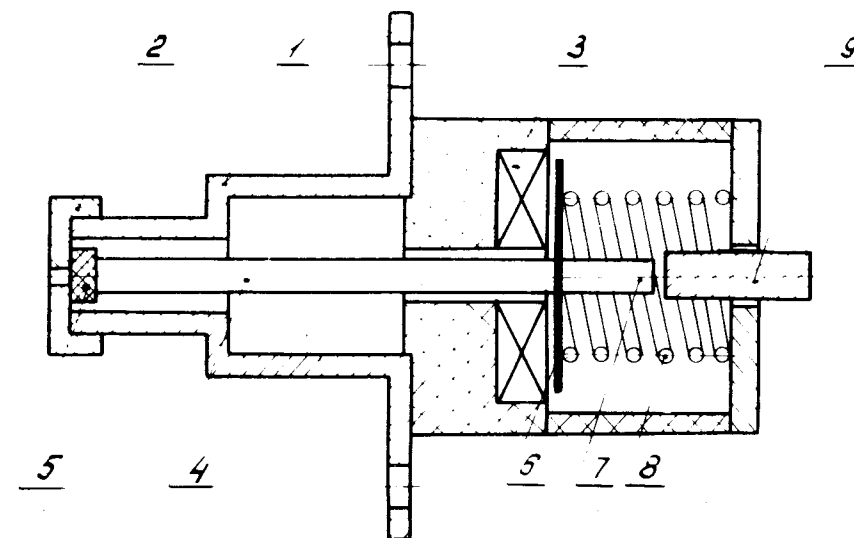


Рис. 4. Схематическое изображение электродинамического клапана.

перекрывающее. вход в сопло, дюралюминиевый диск 6 и титановый наконечник 7. Шток прижимается к соплу стальной пружиной 8. В корпус ввинчен отражатель из титана 9.

Система коммутации позволяет пропускать через катушку 3 импульс тока в виде полуволны синусоиды длительностью 50-150 мкс /в примененном варианте - 65 мкс/ и амплитудой до 4 кА. При этом диск 6 приходит в движение вместе со штоком 4 и уплотнением 5. Сопло 2 газодинамического источника открывается, и происходит истечение свободной струи рабочего газа в вакуумную камеру. Возврат штока в первоначальное положение осуществляется после упругого столкновения наконечника 7 с отражателем 9.

Скорость и длительность открытия клапана можно регулировать, изменяя амплитуду тока, пропускаемого через катушку, и положение отражателя.

Пружина 9, обеспечивающая запираание сопла, имеет жесткость  $3 \cdot 10^6$  дин/см и первоначально поджата на 1 мм.

Намотка катушки 3 выполнена медной трубкой диаметром 3 мм, через которую пропускается охлаждающая катушка вода. Шток 4 имеет диаметр 4 мм и длину 140 мм; диаметр диска - 6-40 мм, толщина - 1,3 мм. Диаметр и длина уплотнения 5 равны 5 мм. Диаметр наконечника 7 - 6 мм, отражателя - 8 мм. Зазор между наконечником и отражателем составляет 0,3 мм.

Для питания катушки клапана использована схема, приведенная на рис. 5.

Ток в катушке коммутируется двумя тиристорами ТД-500, подключенными к емкости 64 мкФ. Максимальное напряжение, подаваемое на емкость, - 1300 В. Зарядка емкости производится от высоковольтного источника /  $U_{max} = 2,5$  кВ,  $I_{зар.} = 1,2$  А/. Для уменьшения времени накопления заряда на емкости использована схема перезарядки. Тиристоры и диоды в цепи перезарядки защищены от перенапряжений лавинными диодами ВЛ-50. Опыт эксплуатации такой схемы питания показал надежность ее работы при частоте срабатываний до 20 Гц. Длительная работа схемы /свыше  $10^6$  срабатываний/ не привела к каким-либо ухудшениям ее характеристик.

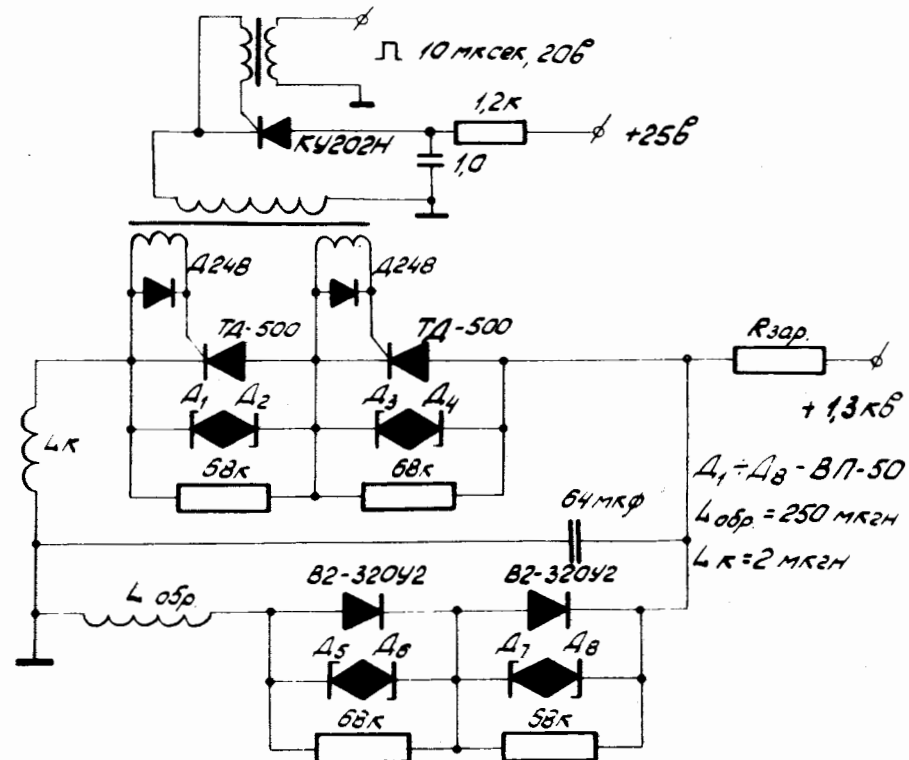


Рис. 5. Принципиальная схема питания катушки клапана.

### Результаты испытаний ЭДК

С целью проверки правильности расчетов определения быстродействия ЭДК и его надежности были проведены стендовые испытания клапана.

Схема для измерения быстродействия клапана /т.е. времени, когда клапан открыт/ контактным способом показана на рис. 6. Минимальное время, в течение которого клапан оставался открытым, т.е. контакты шток-корпус клапана находились в разомкнутом состоянии, составило  $\approx 2$  мкс. На рис. 7 приведены осциллограммы сигналов с сопротивления в цепи указанных контактов и тока в катушке клапана. Время, в течение которого

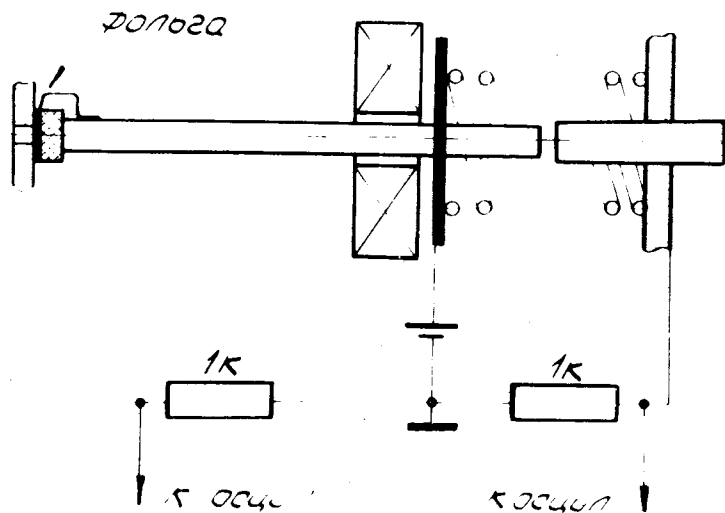


Рис. 6. Схема для измерения времени, в течение которого клапан оставался открытым, и скорости движения штока.

клапан оставался открытым, регулировалось изменением положения отражателя, а также амплитуды  $I_m$  импульса тока в катушке ЭДК. Максимальная скорость штока определялась по результатам измерений моментов времени  $t_1$ , когда замыкались контакты шток - отражатель, при различных фиксированных положениях отражателя. Величина максимальной скорости достигала  $\approx 3$  м/с.

Для получения и исследования параметров пакетов нейтрального газа ЭДК присоединялся к вакуумному объему, в который и происходило истечение свободной струи газа. Газ истекал через цилиндрическое сопло диаметром  $\approx 0,17$  мм. В вакуумном объеме, на перемещающейся штанге, находился ионизационный датчик МИ-10С, с помощью которого измерялась длительность газовых пакетов. Предварительно производилась калибровка датчика. Датчик помещался в импульсный газовый поток с известными параметрами, создаваемый модулятором /вращающимся диском со щелями/, который располагался перед датчиком в стационарном молекуляр-

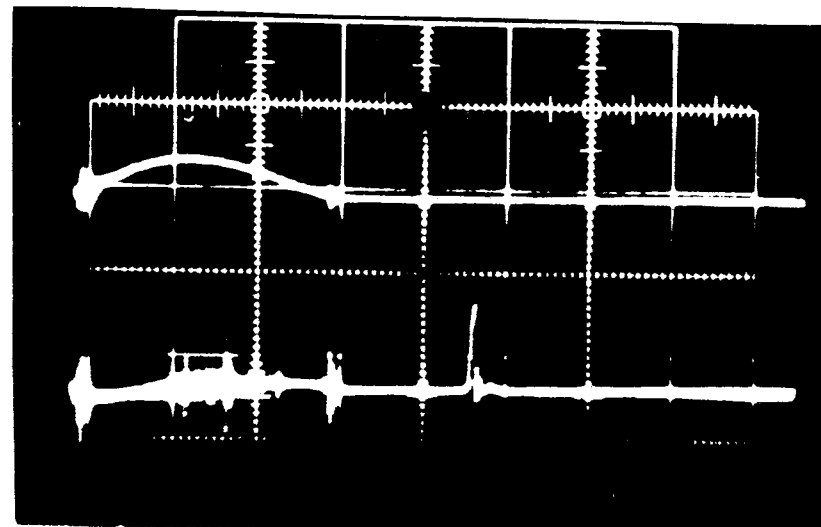


Рис. 7. Осциллограмма тока в катушке клапана /верхний луч/ и сигнала в случае, когда клапан открыт. Цена деления - 20 мкс.

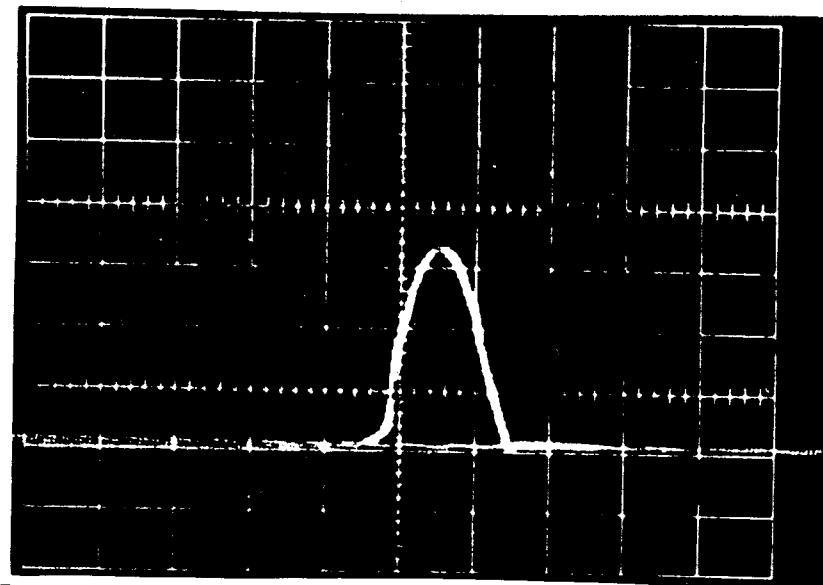


Рис. 8. Осциллограмма сигнала с датчика МИ-10, соответствующего газовой струе, истекающей из клапана. Цена деления - 25 мкс.



ном пучке. Вакуумный объем откачивался до давления не хуже  $1 \cdot 10^{-5}$  Тор.

Электрический сигнал с датчика МИ-10С, соответствующий газовому пакету, наблюдался на осциллографе.

При проведении испытаний в качестве рабочего газа использовался воздух с температурой торможения, равной комнатной /  $T_0 \approx 295^\circ \text{K}$ /. Источник работал в режиме одиночных импульсов.

В качестве величин, характеризующих газовый импульс, принимались амплитуда  $U_m$  сигнала, регистрируемого осциллографом, а также длительность сигнала  $\Delta t$  на уровне  $0,1U_m$ .

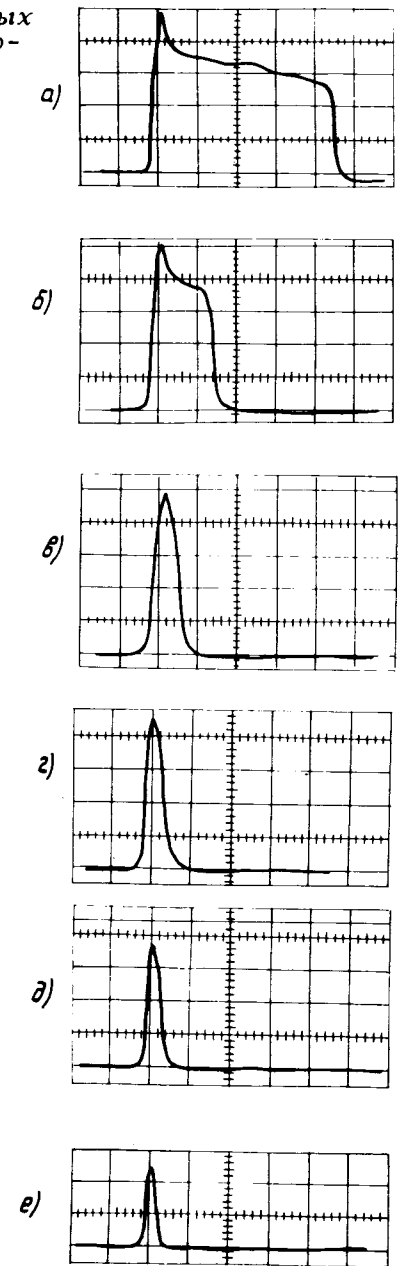
Давление в форкамере клапана  $p_0$  могло изменяться. На рис. 8 показана характерная осциллограмма газового сигнала.

В следующей серии испытаний изучалась возможность регулирования длительности импульса путем перемещения отражателя клапана. Одновременно исследовалось изменение формы импульса при изменении времени открытия клапана. В качестве типичного примера полученных таким образом результатов на рис. 9 приведена серия осциллограмм, соответствующих различным временам открытия клапана, которая получена при  $p_0 = 760$  Тор и расстоянии датчика от сопла  $x = 30$  мм. Зазор между наконечником штока и отражателем уменьшается от режима работы а/ к режиму работы е/ /см. рис. 9/. Из рассмотрения этих осциллограмм можно установить следующий характер изменения формы импульса от его длительности.

При сравнительно больших длительностях сигнал состоит из начального пика и пологого /или платообразного/ участка, соответствующего квазистационарному истечению газа из сопла. По мере уменьшения длительности пологий участок уменьшается при практически неизменной величине и форме начального пика. При некоторой величине длительности импульса /~50 мкс/ квазистационарный участок исчезает, и при дальнейшем сокращении длительности начинает уменьшаться амплитуда пика.

Для получения данных о пространственной структуре потока были определены значения  $U_m$  при различных

Рис. 9. Осциллограммы газовых импульсов при различных положениях отражателя клапана. Цена деления - 50 мкс.

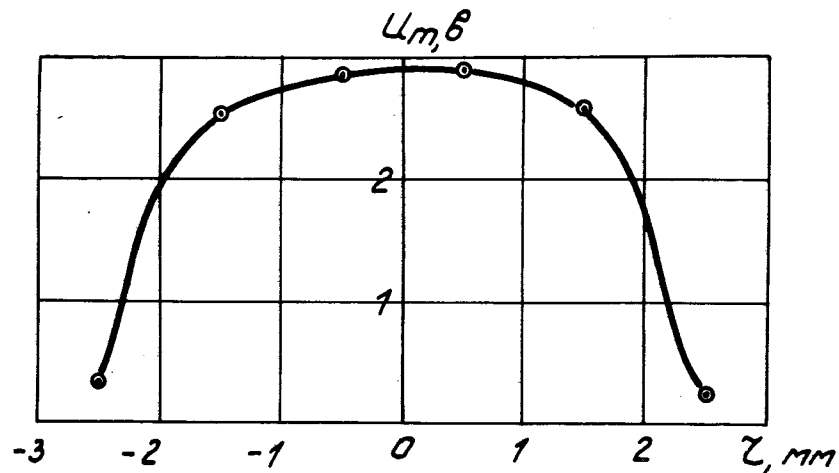


расстояниях датчика от оси сопла. Полученные при этом результаты приведены на *рис. 10*.

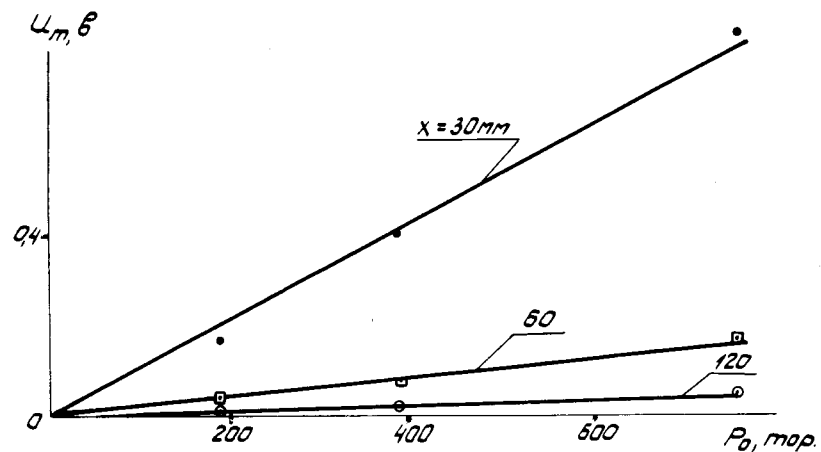
На *рис. 11* показана зависимость плотности газового импульса от давления в форкамере на различных расстояниях от сопла. Из рисунка видно, что плотность газового импульса практически линейно увеличивается с увеличением давления  $p_0$ . Такого результата, впрочем, можно было ожидать заранее. Поэтому его можно трактовать, скорее, как свидетельство постоянства коэффициента пропорциональности между выходным сигналом детектора и плотностью газового импульса при изменении давления в форкамере в достаточно широком диапазоне  $p_0 \approx 30 \div 760 \text{ Тор}$ .

Значительно более интересным представляется тот факт, что в достаточно широком диапазоне расстояний от сопла длительность импульса  $\Delta t$  практически не зависит от давления  $p_0$  /см. *рис. 12*/.

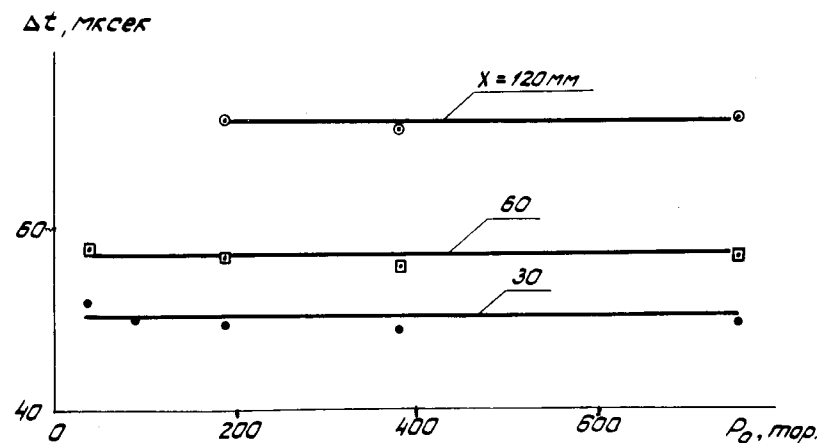
В связи с этим открывается возможность получать необходимую плотность газового импульса, варьируя давление  $p_0$  и не опасаясь "размазывания" импульса.



*Рис. 10.* Сечение потока газа на расстоянии 20 мм от сопла.



*Рис. 11.* Зависимость плотности газового импульса от давления в форкамере на различных расстояниях от сопла.



*Рис. 12.* Зависимость длительности газового импульса от давления в форкамере на различных расстояниях от сопла.

Наконец, на основании измерений, выполненных при различных расстояниях между соплом и детектором, была определена скорость перемещения газового пакета. Эта скорость составила  $7,8 \cdot 10^4$  см/с, что весьма хорошо совпадает с теоретическим значением предельной скорости истечения воздуха в вакуум.

С целью выяснения надежности работы ЭДК было проведено его испытание на ресурс. При этом источник сработал  $10^5$  раз с частотой срабатывания 2 Гц. Проведенные после этого измерения основных параметров газового пакета дали такие же результаты, что и перед испытанием. Внешний осмотр деталей клапана после испытания показал их целостность.

#### *Заключение*

В результате проведенных расчетов, изменения традиционной конструкции и стендовых испытаний изготовлен и проверен быстродействующий электродинамический клапан с улучшенными характеристиками. Наименьшее время, в течение которого клапан оставался открытым, составило 2 мкс. Проведенные испытания ЭДК на ресурс показали высокую надежность его работы. Разработанный клапан может быть применен в установках, в которых требуется создание импульсных струй различных газов с малой длительностью и регулируемой плотностью, например, в газовых источниках, газоразрядных плазменных пушках и т.д.

#### *Литература*

1. В.П.Саранцев и др. ОИЯИ, Р9-5558, Дубна, 1971.
2. В.Георге и др. ОИЯИ, Р9-6555, Дубна, 1972.
3. М.Л.Иовнович, М.Н.Фикс. ОИЯИ, Р9-4849, Дубна, 1969.
4. Л.С.Барабаш и др. ОИЯИ, Р9-7697, Дубна, 1974.
5. П.Е.Ковров и др. ПТЭ, №5, 1973.

6. Б.Новак, С.Пекарек. Приборы для научных исследований. №3, 1970.
7. Г.Б.Умаров и др. ПТЭ, №1, 1961.
8. В.Г.Новиков, Э.П.Павлов, В.Д.Перминов, Б.А.Шестаков. Авторское свидетельство СССР, № 504041 от 21.11.1974 г. Бюллетень ОИПОТЗ, кл. F 16K31/O2, 1976 г., №7, стр. 106.

Рукопись поступила в издательский отдел  
8 декабря 1976 года.