

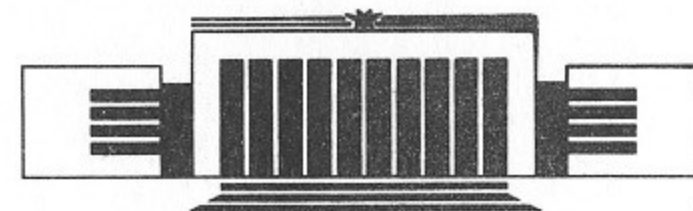


27
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

В.М. Иванов, С.Б. Ли, В.Н. Осипов,
В.Ф. Пиндюрин, В.А. Ушаков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК
КАНАЛОВ ВЫВОДА СИ ТНК
ПРИ ПРОРЫВЕ АТМОСФЕРЫ В КАНАЛ

ПРЕПРИНТ 91-81



НОВОСИБИРСК

Исследование временных характеристик
каналов вывода СИ ТНК при прорыве
атмосферы в канал

В.М. Иванов, С.Б. Лу, В.Н. Осипов,
В.Ф. Пундюрин, В.А. Ушаков

Институт ядерной физики
630090, Новосибирск 90, СССР

АННОТАЦИЯ

В данной работе представлены результаты измерений времени распространения волны давления в канале вывода СИ ТНК при прорыве атмосферы и эффективности действия системы защиты вакуума в накопительном кольце, состоящей из акустической линии задержки, двух быстрых заслонок и вакуумно-плотного затвора пневматического аварийного. В работе приведены расчеты параметров акустической линии задержки. Показано, что короткие каналы вывода СИ с дифференциальной откачкой вакуума могут быть вполне безопасны в случае прорыва атмосферы, если будут оснащены двумя быстрыми заслонками и вакуумно-плотным затвором.

© Институт ядерной физики СО АН СССР

1. ВВЕДЕНИЕ

Накопитель электронов ТНК (г. Зеленоград) является специализированным источником синхротронного излучения (СИ), предназначенным для решения широкого круга задач в области субмикронной и нанотехнологий, в особенности, в области рентгенолитографии. На накопителе ТНК предполагается иметь до 27 рентгенолитографических каналов. Большинство систем совмещения для рентгенолитографии предназначены для работы на воздухе или в гелиевой атмосфере. Для вывода СИ в атмосферу используются тонкие окна из легких металлов или полимеров. Таким образом, перед разработчиками встает проблема защиты накопительного кольца от прорыва атмосферы, вероятность которого весьма велика при одновременной работе большого числа каналов.

Данная работа была выполнена с целью измерения времени распространения волны давления в канале вывода СИ ТНК при прорыве атмосферы и эффективности действия системы защиты вакуума. До настоящего времени разными авторами уже был проведен целый ряд исследований по системам вакуумной защиты [1 - 7] и сложилась широко распространенная практика использования в качестве системы защиты комбинации из акустической линии задержки, которая представляет собой многосегментный вакуумный объем, разделенный коническими перегородками, быстрой заслонки и вакуумно-плотного затвора. Исследованный в данной работе канал вывода СИ также был снабжен двумя быстрыми заслонками (БЗ), акустической линией задержки (АЛЗ) и затвором пневматическим аварийным (ЗПА). Показано, что в коротком канале вывода СИ без АЛЗ объемы насосов, распределенные вдоль канала, работают как довольно эффективная АЛЗ. При наличии двух быстрых заслонок и ЗПА такой канал может быть вполне безопасен при прорыве атмосферы. Добавление АЛЗ к этой системе защиты вакуума перед быстрыми заслонками гарантирует полную безопасность накопительного кольца при прорыве атмосферы в конце канала.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Измерения временных характеристик проводились на прототипе канала вывода СИ ТНК, схема которого приведена на рис. 1. Общая длина канала - 5,68 м. Откачка вакуума в канале осуществлялась тремя магниторазрядными насосами (НМД-0.4-1, ПВИГ-25, НМД-0.1) и обеспечивала вакуум порядка 10^{-4} Па в начале канала (датчик D) и 10^{-3} Па в конце канала (датчик А) без обезгаживающего прогрева. Система защиты вакуума от прорыва атмосферы в конце канала включала акустическую линию задержки АЛЗ (рис. 1(9) и рис. 2), две быстрые заслонки БЗ1 (рис. 1 (6)) и БЗ2 (рис. 1 (11)) и вакуумно-плотный затвор пневматический аварийный ЗПА (рис. 1 (12)). БЗ1 и БЗ2 отличались различными использованными сильфонами (в БЗ1 - более жесткий сварной сильфон конструкции ИЯФ, в БЗ2 - заводской).

Блок-схема измерения времени распространения ударной волны по каналу показана на рис. 3. Прорыв атмосферы в канал выполнялся острым наконечником, разрывающим окно из Al фольги толщиной 0.4 мм в конце канала (окно из Al фольги было использовано для простоты измерений). Во время касания фольги наконечником формировался запускающий импульс для запоминающего двухлучевого осциллографа С8-17. Запуск БЗ и ЗПА производился от измерительной лампы ПММ-46 (рис. 3, датчик А) вакуумметром ВМБ-1/8(N1) при превышении порогового давления $8.7 \cdot 10^{-3}$ Па. По датчикам В, С, D вакуумметр ВМБ-1/8(N2) контролировал время прихода волны давления до АЛЗ (рис. 3, датчик В), до БЗ2 (рис. 3, датчик С) и до начала канала (рис. 3, датчик D) и при превышении давления над пороговым ($8.7 \cdot 10^{-3}$ Па) выдавал сигнал блокировки, который запоминался осциллографом С8-17. Времена срабатывания БЗ фиксировались концевыми оптронными датчиками, а для ЗПА - концевыми выключателями (собственная задержка концевых выключателей порядка 8 мсек.). Измерения проводились как с линией задержки, так и без неё (в этом случае вместо АЛЗ вставлялась труба такой же длины с внутренним диаметром 40 мм). Блок диафрагм (рис. 1 (2)) полностью открыт (апертура 4x4 см). Люминофорные датчики (рис. 1 (4,8)) выведены из канала. Во время экспериментов откачка канала не прекращалась.

Паспортное время задержки включения (выключения) блокировочных устройств ВМБ не более 0.5 сек., а для измерения времени задержки в канале необходима собственная задержка вакуум-

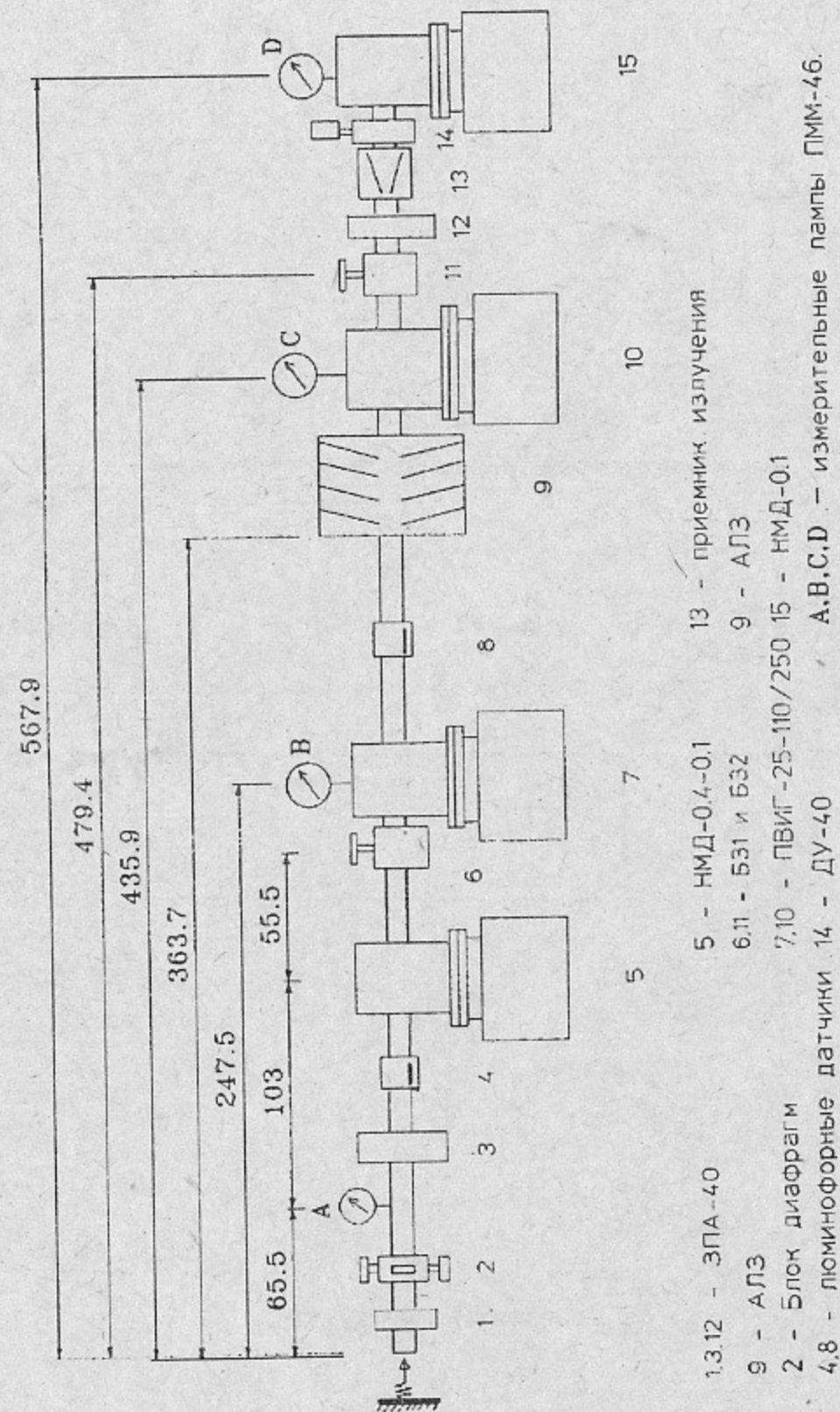
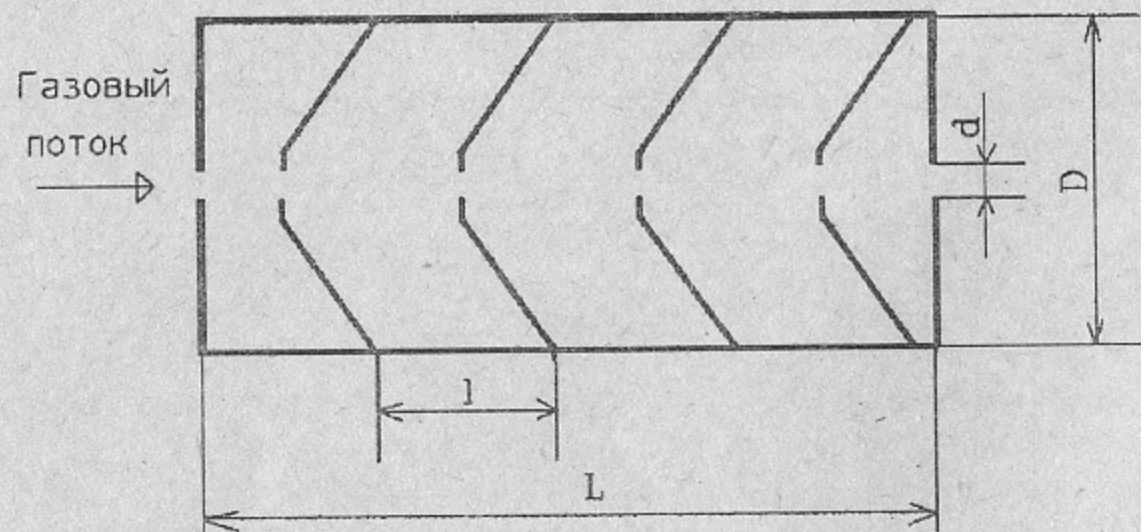
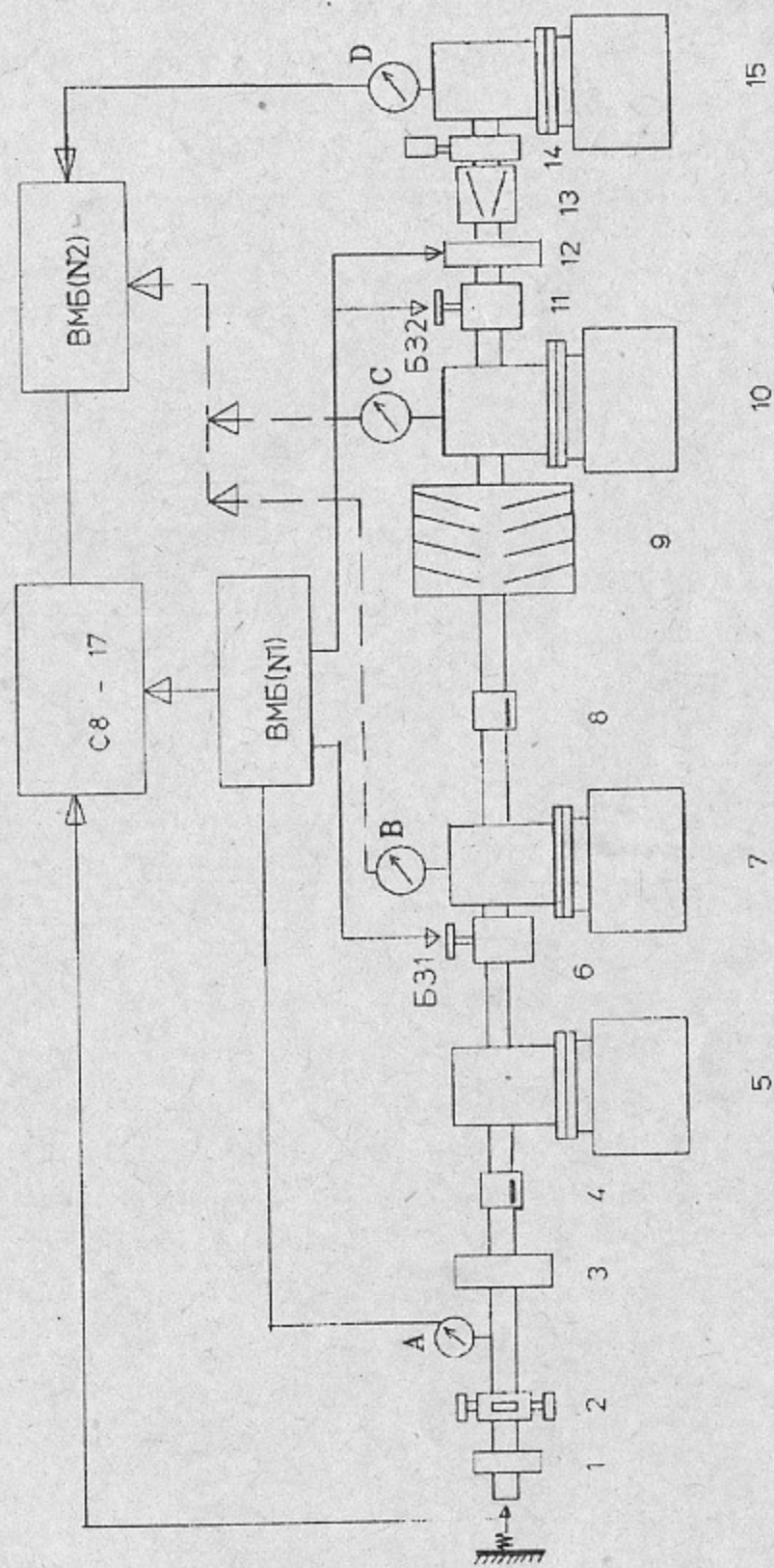


Рис. 1. Схема канала вывода СИ. (Размеры указаны в сантиметрах).



$L = 450 \text{ мм}$
 $l = 110 \text{ мм}$
 $d = 40 \text{ мм}$
 $D = 200 \text{ мм}$

Рис. 2. Акустическая линия задержки.



1,3,12 - ЗПА-40 6,11 - Б3 13 - приемник излучения А,В,С, D - датчики ПММ-46
 9 - АЛЗ 14 - ДУ-40 /наименьший диам.10мм/

АЛЗ - 4-х сегментная. Длина - 450 мм. Расстояние между сегментами - 110 мм.
 Внешний диаметр - 200 мм. Внутренний диаметр диафрагмы - 40 мм.

Рис. 3. Блок-схема измерений времени задержки канала вывода СИ ТНК с АЛЗ.

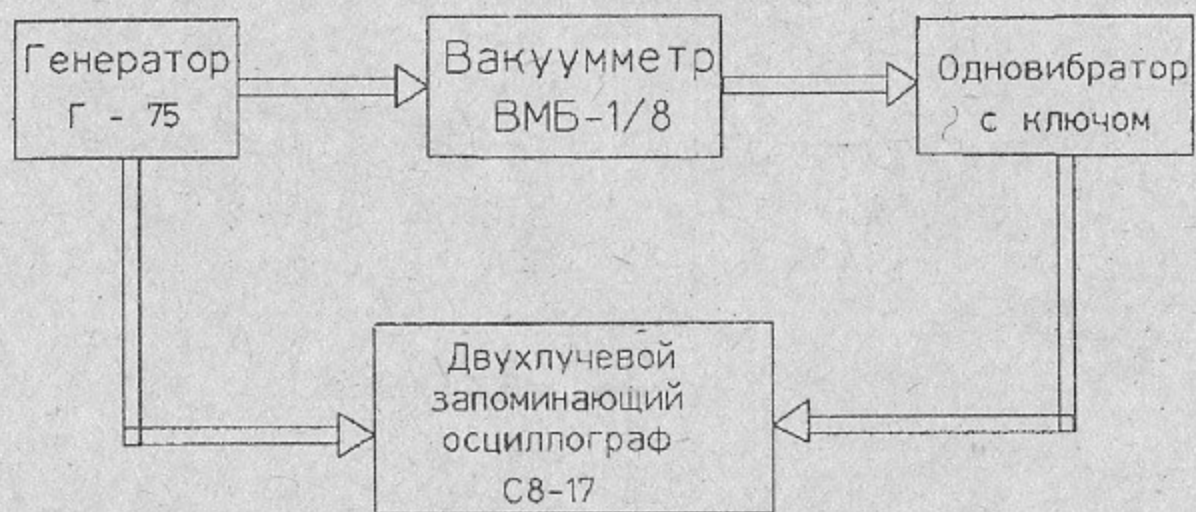


Рис. 4. Блок-схема измерения задержки вакуумметра ВМБ-1/8.

метра ≤ 1 мсек. Поэтому было измерено время задержки включения блокировки ВМБ в зависимости от порогового давления $P_{пор}$ при увеличении давления от начального P_0 до некоторого конечного сверхпорогового давления P_k . Блок-схема измерения приведена на рис. 4. Полученные данные приведены в табл. 1 (в выходных блокировочных ключах удалены конденсаторы $C_3, C_4 = 10$ мкФ/см. схему ВМБ-1/8/).

Табл. 1

P_0 [Па]	P_k [Па]	$P_{пор}$ [Па]	τ [мсек]
1.3×10^{-6}	1.3×10^{-3}	1.0×10^{-3}	00
-----	-----	4.9×10^{-4}	40
-----	-----	1.0×10^{-4}	70
-----	-----	4.9×10^{-5}	60
-----	-----	1.0×10^{-5}	22
-----	-----	4.9×10^{-6}	12
-----	-----	1.8×10^{-6}	5

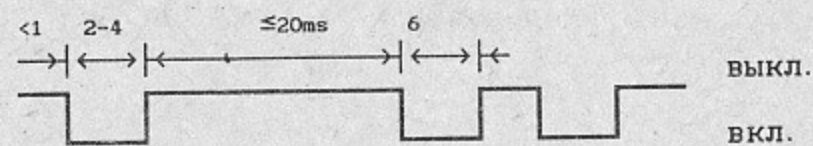
P_0 - начальное давление;
 P_k - конечное давление;
 $P_{пор}$ - пороговое давление;
 τ - время задержки ВМБ-1/8.

Из приведенных данных видно, что необходима модификация ВМБ. Стабильного повышения быстродействия в некоторых ВМБ-1/8 (но не у всех) удалось достичь уменьшением емкости конденсатора $C_1 = 0.68$ мкФ в масштабирующем усилителе до 10 пФ. Причем это изменение не сказалось на остальных параметрах ВМБ. Времена задержки включения блокировки ВМБ после модификации приведены в табл. 2.

Табл. 2

P_0 [Па]	P_k [Па]	$P_{пор}$ [Па]	τ [мсек]
0.8×10^{-6}	1.3×10^{-3}	1.1×10^{-3}	0.45
-----	-----	1.0×10^{-4}	0.30
-----	-----	1.0×10^{-5}	0.16
-----	-----	1.0×10^{-6}	0.1

Кроме того, было обнаружено в процессе измерений, что блокировочный сигнал на выходе ВМБ имеет сложную форму следующего типа:



Это связано со сложными переходными процессами в датчике ПММ-46 при прохождении ударной волны во время прорыва атмосферы. Причем длительность первого импульса включения блокировки ВМБ составляет всего несколько миллисекунд, что меньше 11 мсек, которые необходимы для своевременного надежного срабатывания БЗ и затвора пневматического аварийного (ЗПА). Поэтому к выходу ВМБ подключался дополнительный одновибратор с транзисторным ключом (рис. 5), обеспечивающий необходимую длительность включения блокировки (постоянная времени одновибратора составляет 33 мсек).

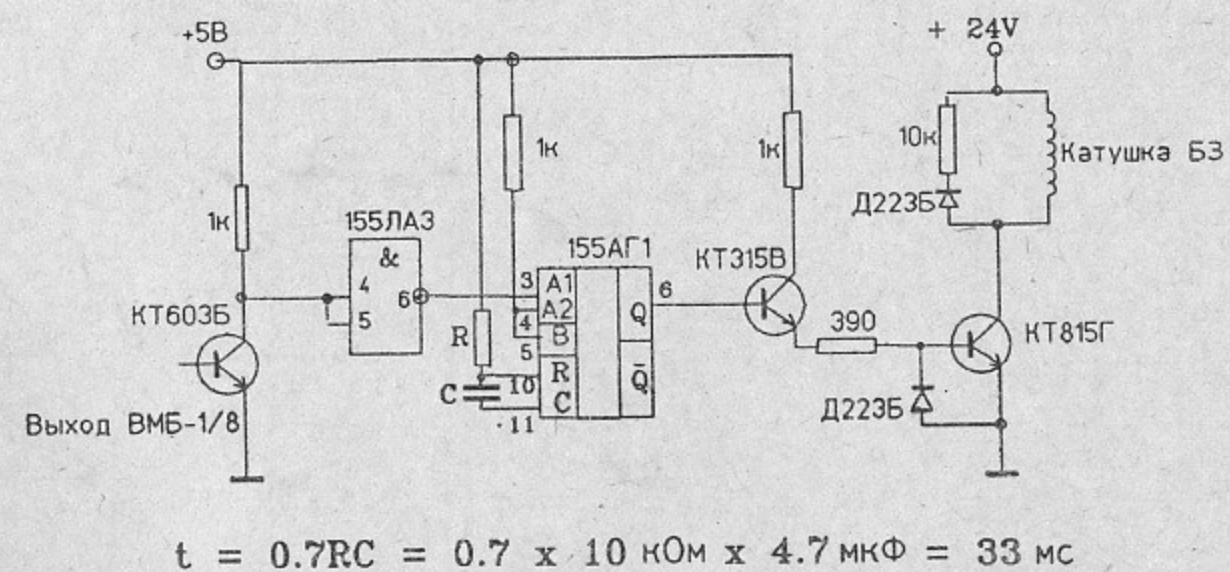
3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Из предварительных измерений получено, что времена срабатывания БЗ1 и БЗ2 равны соответственно 14 ± 1 мсек и 25 ± 1 мсек, время ввода тарелки ЗПА - 340 ± 350 мсек, а время прижатия тарелки ЗПА порядка 1 сек. Следует также отметить, что к концу измерений после нескольких десятков запусков время срабатывания БЗ2 возросло до 30 мсек.

Время распространения волны давления в канале после прорыва атмосферы измерялось для трех следующих вариантов:

- 1) без акустической линии задержки (табл. 3);
- 2) с одной линией задержки (табл. 4);
- 3) с линией задержки, состоящей из 2-х одинаковых АЛЗ (табл. 5).

Все времена распространения волны давления по каналу определялись по срабатыванию блокировки ВМБ при достижении порогового значения давления в исследуемых точках, равного $8.7 \cdot 10^{-3}$ Па (при начальном давлении $10^{-3} \pm 10^{-4}$ Па).



$$t = 0.7RC = 0.7 \times 10 \text{ кОм} \times 4.7 \text{ мкФ} = 33 \text{ мс}$$

Рис. 5. Схема одновибратора с ключом.

3.1 АНАЛИЗ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ БЕЗ АЛЗ И С ОДНОЙ АЛЗ

Из данных, полученных для канала без АЛЗ (табл. 3) при

Данные, полученные для канала без АЛЗ.

Табл. 3.

N	P _a [Pa]	P _c [Pa]	P _d [Pa]	τ _{бз1} [мс]	τ _{бз2} [мс]	τ _c [мс]	τ _d [мс]
1	-- // --	7.5x10 ⁻⁴	2.1x10 ⁻⁴	—	—	34-35	49
2	-- // --	7.5x10 ⁻⁴	2.1x10 ⁻⁴	—	—	34	49
3	-- // --	6.5x10 ⁻⁴	≤ 10 ⁻⁴	—	—	32-33	49
4	-- // --	5.6x10 ⁻⁴	≤ 10 ⁻⁴	—	—	35	- //
5	3.2x10 ⁻³	-- // --	3.7x10 ⁻⁴	—	—	- // -	47
1	-- // -	3.2x10 ⁻³	-- // --	—	24	-- // -	130
2	2.7x10 ⁻³	-- // --	4.9x10 ⁻⁴	—	27	- // -	97
3	8.7x10 ⁻⁴	-- // --	2.7x10 ⁻⁴	—	28	- // -	92
4	- // -	-- // --	1.8x10 ⁻⁴	—	36	- // -	78
5	1.5x10 ⁻³	- // -	2.4x10 ⁻⁴	—	37	- // -	74
6	2.1x10 ⁻³	- // -	6.5x10 ⁻⁴	—	43	- // -	56
7	3.7x10 ⁻³	- // -	- // -	—	45	- // -	53
8	5.6x10 ⁻³	- // -	- // -	—	45	- // -	50
9	4.2x10 ⁻³	- // -	- // -	—	47	- // -	51
1	2.7x10 ⁻³	- // -	4.2x10 ⁻⁴	+	—	- // -	320
2	1.3x10 ⁻³	- // -	6.5x10 ⁻⁵	< 20	—	- // -	350
1	3.7x10 ⁻³	- // -	3.2x10 ⁻⁴	+	~ 30	- // -	500
2	2.7x10 ⁻³	- // -	2.7x10 ⁻⁴	+	~ 30	- // -	530
3	3.2x10 ⁻³	-- // --	2.7x10 ⁻⁴	< 20	+	- // -	510

P_a, P_c, P_d - показания датчиков А, С, D до прорыва атмосферы;

τ_{бз1}, τ_{бз2} - время срабатывания БЗ1 и БЗ2;

τ_c, τ_d - время срабатывания ВМБ от датчиков С и D;

P_{пор.} = 8.7 · 10⁻³ Па;

— - БЗ открыта, τ_{бз} = ∞;

+

-- // -- - не измерялось.

12

Данные, полученные для канала с АЛЗ.

Табл. 4.

N	P _a [Pa]	P _c [Pa]	P _d [Pa]	τ _{бз1} [мс]	τ _{бз2} [мс]	τ _c [мс]	τ _d [мс]
1	3.2x10 ⁻³	-- // --	1.0x10 ⁻⁴	—	—	- // -	62*
2	1.5x10 ⁻³	-- // --	1.3x10 ⁻⁵	—	—	42	65*
3	4.2x10 ⁻³	7.5x10 ⁻⁴	3.7x10 ⁻⁴	—	—	42	- // -
4	-- // --	5.6x10 ⁻⁴	1.1x10 ⁻⁴	—	—	43	64
5	1.0x10 ⁻³	-- // --	2.4x10 ⁻⁴	—	—	- // -	60
1	4.9x10 ⁻³	-- // --	1.5x10 ⁻⁴	—	~ 25	- // -	115
2	3.2x10 ⁻³	-- // --	1.3x10 ⁻⁴	—	24	- // -	120
3	3.2x10 ⁻³	-- // --	1.0x10 ⁻⁴	—	+	- // -	130
1	1.1x10 ⁻³	-- // --	7.5x10 ⁻⁵	~ 20	—	- // -	410
2	3.2x10 ⁻³	-- // --	2.4x10 ⁻⁴	+	—	- // -	410
1	3.7x10 ⁻³	-- // --	3.7x10 ⁻⁴	+	+	- // -	610
2	4.2x10 ⁻³	-- // --	1.8x10 ⁻⁴	+	≤ 30	- // -	600

* - P_{пор.} = 5.6x10⁻³ Па

Данные, полученные для канала со сдвоенной АЛЗ.

Табл. 5

N	P _a [Pa]	P _c [Pa]	P _d [Pa]	τ _{бз1} [мс]	τ _{бз2} [мс]	τ _c [мс]	τ _d [мс]
1	-- // --	1.1x10 ⁻³	5.5x10 ⁻⁴	—	—	54	- //
2	-- // --	5.6x10 ⁻⁴	1.3x10 ⁻⁴	—	—	54	83
3	-- // --	7.5x10 ⁻⁴	1.5x10 ⁻⁴	—	—	50	82
1	1.5x10 ⁻³	-- // --	1.0x10 ⁻⁴	—	34	- // -	170
2	2.1x10 ⁻³	-- // --	8.7x10 ⁻⁵	—	~ 30	- // -	167
1	2.4x10 ⁻³	-- // --	1.2x10 ⁻⁴	~ 15	—	- // -	450
2	2.4x10 ⁻³	-- // --	3.2x10 ⁻⁴	~ 10-15	—	- // -	450
1	1.5x10 ⁻³	-- // --	2.7x10 ⁻⁴	+	~ 30	- // -	640
2	2.7x10 ⁻³	-- // --	1.5x10 ⁻⁴	+	+	- // -	620

13

открытых заслонках, следует, что время распространения волны давления до датчика С $\tau_c = 34 \pm 0.5$ мсек и до начала канала (датчик D) $\tau_d = 48.5 \pm 0.4$ мсек. В двух экспериментах было также измерено время распространения волны давления до датчика В, равное 10 мсек.

Изменяя время задержки ВМБ(N1), можно измерить зависимость времени прихода волны давления в конец канала τ_d (датчик D) от времени срабатывания БЗ2 ($\tau_{БЗ2}$) в отсутствие АЛЗ при возрастании давления в канале от начального порядка 10^{-4} Па до порогового давления $8.7 \cdot 10^{-3}$ Па (вторая часть табл. 3). На рис. 6 представлена эта зависимость. Из рисунка видно, что время срабатывания быстрой заслонки ≈ 25 мсек вполне достаточно для перекрытия волны давления газа в данном канале без применения АЛЗ. Крестиками на графике показаны данные для канала с АЛЗ. Эти результаты легко можно объяснить из данных по временам задержки самого канала до БЗ2 с АЛЗ и без АЛЗ. Время задержки канала до БЗ2 без АЛЗ равно 34 ± 0.5 мсек, а с АЛЗ - 42 ± 0.5 мсек, т.е. заслонка с временем срабатывания ≈ 25 мсек успевает перекрыть канал даже без АЛЗ. Отсюда также можно получить время задержки АЛЗ, равное 8 ± 1 мсек.

Т.к. время ввода тарелки ЗПА равно 340 - 350 мсек, а время задержки всего канала при срабатывании БЗ и АЛЗ равно 120 ± 130 мсек, то этого явно недостаточно для защиты накопительного кольца. Поэтому были проведены измерения времен распространения волны давления при одновременном срабатывании БЗ1 и БЗ2 и были получены существенно большие времена задержки. Эти данные для канала без АЛЗ приведены в табл. 3. Время задержки всего канала в данном случае составило 500 ± 530 мсек. Несмотря на то, что время срабатывания БЗ1 равно 13 ± 15 мсек, а время прихода волны давления до датчика В равно 10 мсек, т.е. БЗ1 заведомо не успевает перекрыть фронт волны давления, БЗ1 тем не менее существенно уменьшает натекание в канал. Это доказывают данные по временам задержки канала без АЛЗ при срабатывании только одной БЗ1, которые равны 320 ± 350 мсек. Для канала с АЛЗ это время равно 410 мсек, а при срабатывании двух БЗ $600 - 610$ мсек.

Таким образом, в данном канале две быстрые заслонки даже без АЛЗ обеспечивают достаточное время для ввода тарелки ЗПА и последующего прижатия тарелки.

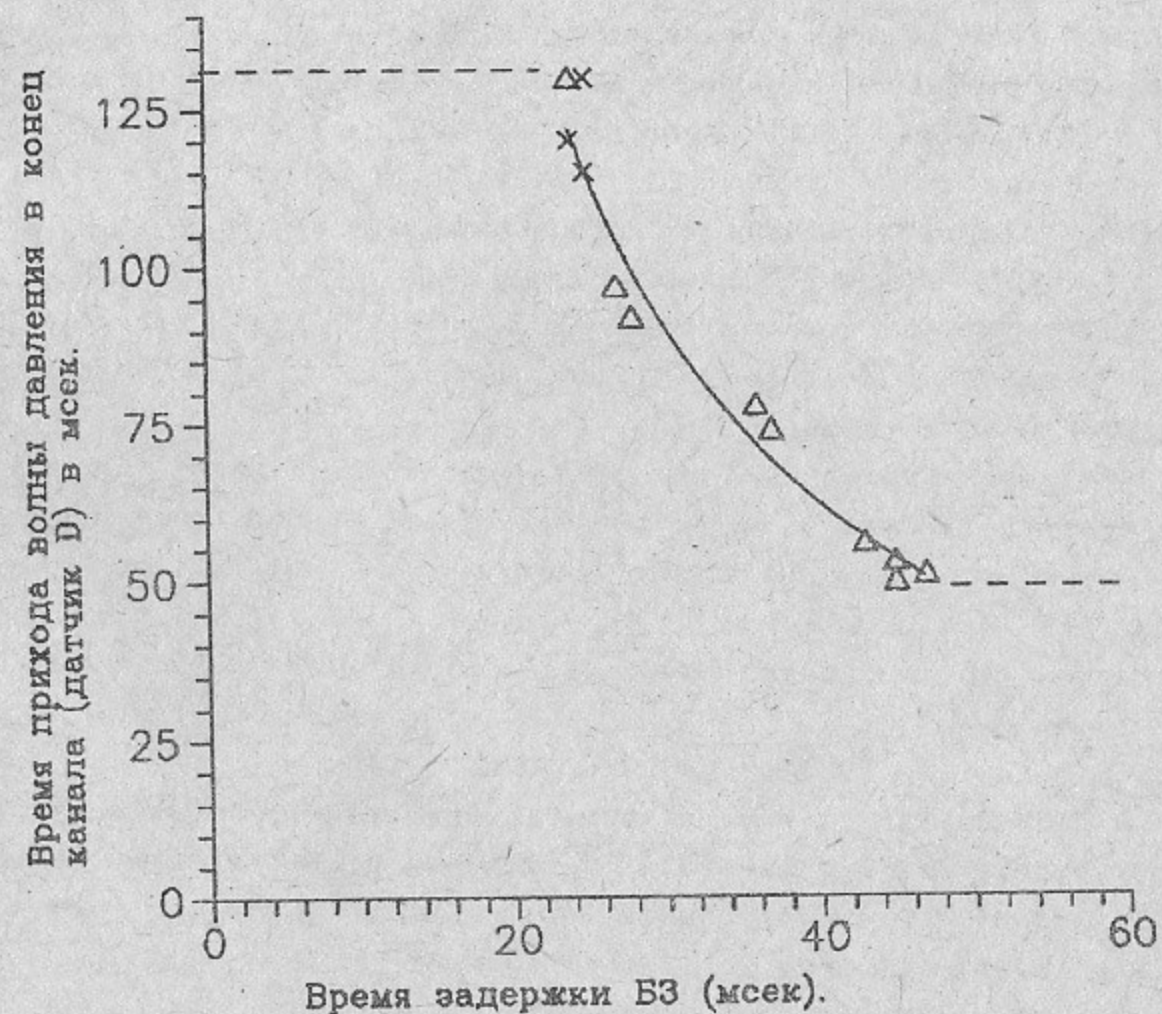


Рис. 6. Зависимость времени прихода волны давления в конец канала от времени срабатывания БЗ.

3.2 АНАЛИЗ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ СО СДВОЕННОЙ АЛЗ

Для канала со сдвоенной линией задержки были получены следующие времена:

- время срабатывания блокировки ВМБ от датчика С (τ_c) при открытых БЗ равно 50+54 мсек. Отсюда определяем время задержки сдвоенной АЛЗ ~20 мсек при прорыве атмосферы;
- время задержки фронта волны давления на длине всего канала τ_d при срабатывании БЗ2 равно ~ 170 мсек, а при срабатывании БЗ1 - 450мсек;
- время задержки канала τ_d при срабатывании двух БЗ равно 620+640мсек.

Из полученных данных можно заключить, что акустическая линия задержки данной конфигурации (рис. 2) даже в сдвоенном варианте не эффективна.

Учитывая, что БЗ и АЛЗ не обеспечивают плотного перекрытия канала, а также большое время полного срабатывания ЗПА, которое в данном случае обеспечивает только сохранение форвакуума при аварийном срабатывании ($\geq 10^{-1}$ Па), следует заключить, что необходима более эффективная АЛЗ.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В работах [1, 2] была изучена зависимость эффективности АЛЗ от геометрических параметров и определено, что наиболее приемлемыми являются следующие параметры:

- длина линии задержки $L = 1500+2000$ мм;
- длина одного сегмента $l \approx 320$ мм;
- отношение диаметров $D/d > 5$;
- форма диафрагм коническая;
- количество сегментов $n \geq 6$.

Преимущество конических диафрагм в АЛЗ можно объяснить на основе газовой динамики [8]. Задача о АЛЗ аналогична задаче о диффузорах в газовой динамике, применяющихся, например, в двигателях самолетов. Сопротивление диффузора (в АЛЗ это коническая диафрагма) складывается из потерь на трение и на вихреобразование. Причем основной вклад в потери вносит вихреобразование, которое вызывается отрывом пограничного слоя от стенок диффузора. С ростом угла раствора диффузора потери растут. Это объясняется тем, что с увеличением угла раствора вихревая зона становится неустойчивой и перемещается от конца диффузора к его началу.

Таким образом, при углах раствора $\alpha \geq 60^\circ$ почти вся стенка диффузора покрыта вихревой областью, и следовательно, при таких углах растут дополнительные потери из-за затрат энергии потока газа на возобновление вихревой зоны. В сверхзвуковых диффузорах используются целые системы диффузоров, которые наиболее эффективны при сверхзвуковых скоростях. А именно этот случай мы имеем при прорыве атмосферы (согласно [2] скорость волны давления ≈ 1100 м/сек при прорыве атмосферы в канал).

Для оценки параметров АЛЗ нами была использована газодинамическая модель [1]. В этой модели, пригодной для расчетов времени задержки АЛЗ при прорыве атмосферы, механизм работы АЛЗ рассматривается по аналогии с соплом Лавала для понижения сверхзвуковой скорости потока газа до дозвуковой и время распространения фронта волны давления газа через АЛЗ определяется из системы уравнений газовой динамики:

$$\frac{M \cdot V}{k \cdot R \cdot T_j} \cdot \frac{dP_j}{dt} = \frac{P_{j-1}}{\sqrt{T_{j-1}}} \cdot \frac{P_j}{\sqrt{T_j}} \quad (4)$$

$$k = s \cdot \sqrt{\frac{M \cdot \gamma}{R}} \cdot \left[\frac{2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{\gamma + 1}{2 \cdot (\gamma - 1)}} \quad (5)$$

где

- P_j, T_j - давление и температура в j -ом сегменте АЛЗ,
 M - молекулярная масса воздуха (29),
 R - газовая постоянная,
 $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ - отношение теплоемкостей,
 s - площадь отверстия диафрагмы АЛЗ,
 V - объем сегмента.

Эта система уравнений имеет решение при $\gamma = 1$:

$$Y_j = 1 - e^{-at} \cdot \left[1 + a \cdot t + \dots + \frac{(a \cdot t)^{j-1}}{(j-1)!} \right], \quad (6)$$

$$\text{где } Y_j = \frac{P_j}{P_0},$$

P_0 - атмосферное давление,