

On the Issue of Experimental Study of the Opening of Diaphragms in the Gas-Dynamic System CST-14

S. N. Vasilieva, I. V. Guk, V. D. Nasonov

*Special Materials Ltd,
Saint Petersburg, 195277, Russia*

VasilyevaSN@npo-sm.ru

Abstract

The results of a study of the possibility of shatter-free opening of diaphragms with notches of various depths made of 0.5 mm thick AMg6M sheet are presented. The study showed that there is a relationship between the notch depth and the diaphragm actuation pressure.

Keywords: shock tube, diaphragms, notches, shatterproof opening, shock wave.

The article presents an analysis of studies aimed at studying the opening of diaphragms with notches. The results of a study aimed at determining the possibility of shatter-free opening of diaphragms with notches of various depths made of 0.5 mm thick AMg6M sheet are presented. The experimental study proved that to ensure shatter-free opening of the diaphragms in the KUT-14 installation, it is necessary to use diaphragms made of AMg6M sheet with a notch depth of 0.3 mm. In addition, the study showed that there is a relationship between the depth of the notch and the pressure of the diaphragm, which subsequently leads to a decrease in the parameters of the generated air shock wave.



(a)



(b)



(c)

Variations of opening of 0.5 mm thick AMg6M diaphragms with a notch depth of 0.3 mm

УДК 533.6.071.3

К вопросу экспериментального изучения раскрытия диафрагм в газодинамической установке КУТ-14

С. Н. Васильева, И. В. Гук, В. Д. Насонов

*АО «НПО Спецматериалов»,
Россия, г. Санкт-Петербург, 195277*

VasilyevaSN@npo-sm.ru

Аннотация

Представлены результаты исследования возможности безосколочного раскрытия диафрагм с насечками различной глубины, выполненных из листа АМг6М толщиной 0.5 мм. Исследование показало, что существует зависимость между глубиной насечки и давлением срабатывания диафрагмы.

Ключевые слова: Ударная труба, диафрагмы, насечки, безосколочное раскрытие, ударная волна.

1. Введение

Для ударных труб, где камера низкого давления (КНД) отделена от камеры высокого давления (КВД) разрывной диафрагмой, характерно образование высокоскоростных осколков в момент проведения экспериментальных исследований [1–2]. Проведенные в ФИЦ ХФ им. Н.Н. Семенова РАН экспериментальные исследования показали, что в конических ударных трубах возможно моделировать разрыв газонаполненных сосудов и резервуаров под давлением, а за счет высокоскоростных осколков, образованных разрывной диафрагмой, можно рассматривать параметры движения оболочек сосудов [3–4]. С одной стороны, моделирование движения высокоскоростных острых осколков, метаемых за счет ударной волны, в лабораторных условиях, является перспективным направлением, позволяющим проводить ряд исследований по разработке средств бронезащиты, однако, при такой постановке эксперимента невозможно помещать измерительную аппаратуру, образы содержащие в себе датчики давления, провода и пр. в канал КНД.

Как описано в [5–6], при постановке эксперимента, когда образец помещается в ударную трубу или на срез трубы, как правило, ведется высокоскоростная фиксация, а также регистрация давлений на поверхности и/или внутри образца. Подобные измерения позволяют исследовать поведение фронта ударной волны при взаимодействии с объектом исследования и полноценно изучить ударно-волновые процессы. Использование диафрагм для разделения КВД и КНД в такой постановке эксперимента ведет к определенным рискам, например, к повреждению осколками диафрагмы дорогостоящей аппаратуры или повреждению самого образца исследования.

Авторами данной статьи рассмотрены виды разрывных диафрагм, представлен комплексный анализ зарубежных исследований, направленных на изучение вопроса раскрытия диафрагм в ударных трубах. Показано и проанализировано экспериментальное исследование на газодинамической установке «КУТ-14» с целью выявления параметров безосколочного раскрытия диафрагм.

2. Анализ исследований раскрытия диафрагм

Диафрагмы, используемые в ударных трубах по принципу действия идентичны предохранительным мембранам – специально ослабленными элементам конструкции сосудов высокого давления с точно рассчитанным порогом разрушения по давлению [7]. Подобные мембраны, в зависимости от характера разрушения, подразделяют на следующие типы:

1) разрывные мембраны (рис. 1, а), которые изготовляют из тонколистового проката и устанавливают во фланцевых соединениях при помощи специальных зажимных колец. Их выполняют сплошными, с прорезями и с герметизирующей подложкой в виде пленки из коррозионностойкого материала или с вакуумной подложкой;

2) хлопающие мембраны (рис. 1, б), которые имеют форму сферического купола, выпуклая сторона которого обращена к зоне повышенного давления. При срабатывании купол выворачивается в обратную сторону, ударяется о крестообразный нож и разрушается. Подобные мембраны используют для работы с относительно небольшими давлениями и изготавливают из пластичных материалов;

3) ломающиеся мембраны (рис. 1, в), которые изготовляют из хрупких материалов (чугуна, графита). Подобные мембраны наименее инерционны, поскольку их срабатыванию не предшествует пластическая деформация;

4) срезные мембраны (рис. 1, г), которые при срабатывании срезаются по кромке прижимного кольца; изготавливаются из мягких материалов. Во избежание деформаций прогиба мембрана имеет утолщение по всей рабочей части. Недостатком данным мембран является большой разброс давления срабатывания;

5) отрывные мембраны (рис. 1, д), которые имеют форму колпачков с ослабленным сечением в виде канавки или проточки;

6) специальные мембраны (рис. 1, е), которые выполняются с разрывными стержнями или болтами, с пружинным механизмом, а также стеклянными с ударным механизмом и др.

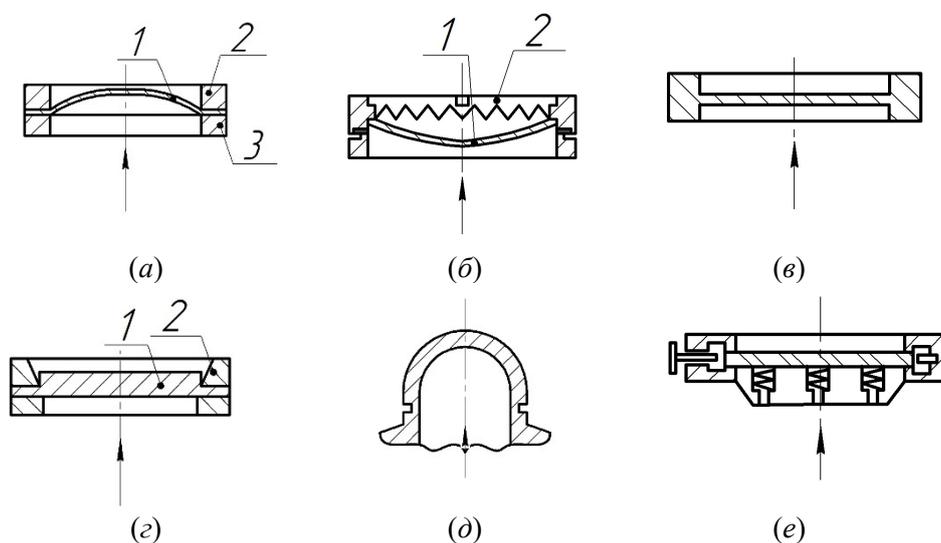


Рис. 1. Типы мембран: (а) – разрывные (1 – мембрана, 2, 3 – зажимные кольца); (б) – хлопающие (1 – мембрана, 2 – крестообразный нож); (в) – ломающиеся; (г) – срезные (1 – мембрана; 2 – прижимной нож); (д) – отрывные; (е) – специальные

Применение различных материалов для изготовления мембран ограничивается максимально допустимой рабочей температурой в месте их установки. При более высоких температурах возможны ложные срабатывания мембран при рабочем давлении вследствие значительной ползучести материала. Некоторые характеристики материалов, идущих на изготовление промышленных мембран, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики материалов промышленных мембран

Материал мембран	Максимальный рабочий диаметр, мм	Максимальная рабочая температура, °С	$p_c \cdot D$, МПа·мм	Предел прочности при одностороннем растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве
Алюминий	400	100	10 ÷ 40	40 ÷ 120	0.03 ÷ 0.2
Никель	140	480	44 ÷ 400	450 ÷ 550	0.02 ÷ 0.1
Нержавеющая сталь	300	300	172	800 ÷ 1000	0.05 ÷ 0.2
Титан	140	300	48 ÷ 96	–	–
	170	300	270 ÷ 320	–	–
	300	300	687	–	–
Латунь	140	150	24 ÷ 60	300 ÷ 600	0.1 ÷ 0.15
	225	150	65 ÷ 230	–	–
Бронза	65	150	30.5 ÷ 79	400 ÷ 900	0.03 ÷ 0.2

Величина $p_c \cdot D$ – произведение давления срабатывания p_c на рабочий диаметр мембраны; D – является основным критерием для определения возможности изготовления мембраны из данного материала

Каждую из описанных мембран возможно устанавливать в ударные трубы в качестве разрывных диафрагм. Так, например ООО «Лаборатория МПУ» [8] производит хлопающие диафрагмы для ударных труб с различными видами насечек для обеспечения безосколочного их раскрытия (табл. 2.)

Таблица 2

Хлопающие диафрагмы

Название и тип мембраны	Вид целой мембраны	Вид после срабатывания	
Разрывная мембрана прямого действия (давление прикладывается к вогнутой части мембраны) МР-1			
			Давление срабатывания 2.45 Па ÷ 122 Па
			Точность срабатывания ± 10 ÷ 20 %
Разрывная мембрана прямого действия МР-5			
			Давление срабатывания 24.5 Па ÷ 490 Па
			Точность срабатывания ± 5 ÷ 10 %
	Насечка выполнена в виде радиальных линий на выпуклой части мембраны		

Продолжение Таблицы 2

Хлопающая мембрана обратного действия (давление прикладывается к выпуклой части мембраны) МХ-1		
	Давление срабатывания 4.9 Па ÷ 588 Па	
	Точность срабатывания ± 5 ÷ 10 %	
Насечка выполнена по аналогии с насечкой на мембране МР-1, но расположена на вогнутой части мембраны		

В целом, наиболее актуальным направлением исследования безосколочного раскрытия диафрагм, является изучение процессов раскрытия диафрагм с насечками. При раскрытии такой диафрагмы насечки разрываются, образуя треугольные лепестки.

Так, например, статья [9] исследовалось влияние радиуса кривизны выпуклой части разрывной диафрагмы на скорость раскрытия. Диафрагма была выполнена из листа алюминиевого сплава 1050 (русский аналог – АД0). Диафрагмы имели следующие геометрические параметры: общий диаметр 150 мм, диаметр рабочей части 54 мм, толщина 0.5 мм. Радиус кривизны выпуклой части диафрагм составлял 60, 80 и 120 мм. В ходе исследования использовались диафрагмы без насечек и с крестообразной насечкой.

По результатам испытаний было установлено, что скорость раскрытия диафрагм с насечками выше, чем без насечек. Также было зафиксировано давление разрыва для диафрагм толщиной 0.4 мм с насечкой глубиной 0.1 мм и без неё, оно составило 145 кПа и 200 кПа соответственно.

Авторами статьи [10] создана модель разрушения разрывной диафрагмы с разным количеством насечек. Нагружение диафрагмы происходило в импульсном режиме со скоростью 500 МПа/с. В качестве материала модели была выбрана сталь S235JR (русский аналог – Ст2сп, Ст2пс, Ст3пс, Ст3сп). Геометрические параметры моделируемой диафрагмы были следующие: диаметр 800 мм, диаметр рабочей части 720 мм, толщина 2 мм, радиус выпуклой части 1320 мм.

Схема насечек указана на рис. 2. Насечки имели форму прямоугольника шириной 5 мм и высотой 0.8 мм (рис. 3). Длина насечек составляла 700 мм. Концы насечек располагались на расстоянии 10 мм от края рабочей зоны диафрагмы.

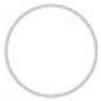
Количество насечек	0	2	3	4	6	8	12
Схема нанесения насечек							
Вероятный характер разрушения							

Рис. 2. Схема расположения насечек [10]

В результате моделирования были получены зависимости времени раскрытия диафрагмы и давления срабатывания от количества насечек на диафрагме. Наименьшее время

и давление при этом оказалось у диафрагмы с 2 насечками, в то время как у диафрагм имеющих большее количество насечек эти показатели примерно равны. Давление срабатывания составило 510 МПа для диафрагмы без насечек, 165 МПа для диафрагмы с 2 насечками и 180 МПа с 3, 4, 6, 8 и 12 насечками.

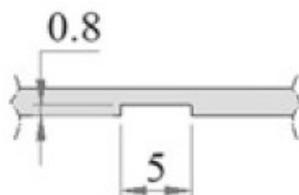


Рис. 3. Схема расположения насечек [10]

Процесс раскрытия диафрагмы с крестообразной насечкой в ударной трубе был представлен в работе [11]. Для эксперимента использовалась медная диафрагма диаметром 50 мм и толщиной 1.5 мм. На диафрагме была выполнена крестообразная насечка глубиной 1 мм. На рис. 4 приведены кадры высокоскоростной съемки раскрытия диафрагмы. На кадрах можно увидеть, что крестообразный разрез сохраняется до полного открытия диафрагмы.



Рис. 4. Кадры раскрытия диафрагмы

В работе [12] исследовалось влияние условий разрыва диафрагм на самовоспламенение водорода при выпуске его в воздушную среду. Используемые для испытаний диафрагмы были выполнены из меди, латуни или алюминия, имели рабочий диаметр 20 мм и толщины 0.2 мм, 0.4 мм и 0.5 мм. Используемые диафрагмы имели крестообразную насечку длиной 11 мм и шириной 1 мм. Глубина насечек варьировалась от 30 до 160 мкм. В результате проведенной работы, авторами были получены давления срабатывания диафрагм в зависимости от глубины насечки (табл. 3).

Таблица 3

Результаты испытаний диафрагм с различной глубиной насечек [12]

Материал диафрагмы	Толщина диафрагмы, мм	Глубина насечки, мкм	Давление срабатывания, МПа
Алюминий	0.4	45 ÷ 140	9.5 ÷ 5.0
Алюминий	0.5	50 ÷ 150	14.0 ÷ 8.8
Латунь	0.2	60 ÷ 130	15.2 ÷ 4.5
Медь	0.2	65 ÷ 120	8.0 ÷ 3.0

В табл. 3 в графах «Глубина насечки» и «Давление срабатывания» указаны диапазоны значений, то есть для алюминиевой диафрагмы толщиной 0.4 мм при глубине насечки 45 мкм происходил разрыв диафрагмы при давлении 9.5 МПа, а при глубине насечки 140 мкм – 5.0 МПа.

В результате проведенных испытаний авторы доказали, что существует линейная зависимость между глубиной насечки и давлением срабатывания диафрагмы.

Решение проблемы образования осколков при использовании разрывных диафрагм было предложено авторами работы [13]. Используемая диафрагма была выполнена из ли-

стовой стали толщиной 2 мм. Общий диаметр диафрагмы составлял 168 мм, рабочий диаметр 126 мм (рис. 5).

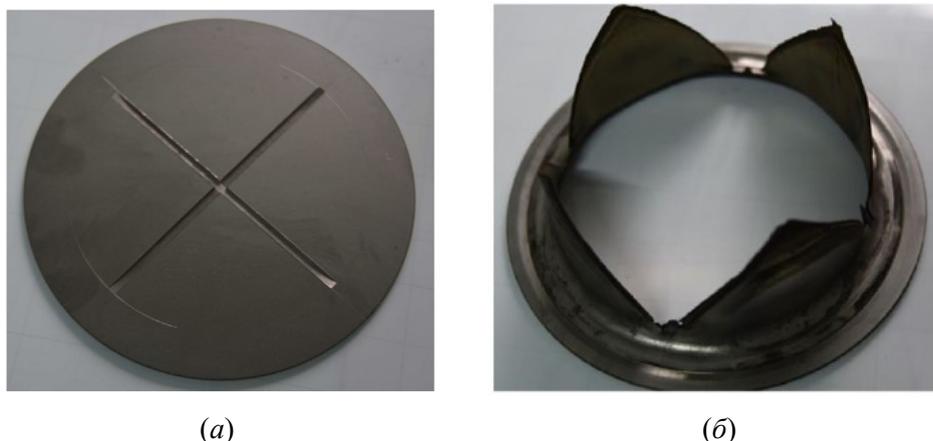


Рис. 5. Вид используемой диафрагмы: (а) – до начала эксперимента; (б) – после проведения эксперимента

На диафрагмах использовалась крестообразная насечка глубиной 1.37 мм. Давление срабатывания таких диафрагм составило 25 МПа.

Анализ исследований показывает, что, в основном, в ударных трубах для обеспечения безосколочного раскрытия используются диафрагмы с насечками. Как правило, глубина насечки редко превышает половину толщины диафрагмы. Увеличение глубины насечки приводит к уменьшению давления разрыва диафрагмы, что в последствии приводит к уменьшению давления во фронте ударной волны, уменьшению длительности фазы сжатия и снижению импульса.

3. Экспериментальное исследование раскрытия диафрагм в установке КУТ-14

Исследование раскрытия диафрагм проводилось на газодинамической установке КУТ-14. КУТ-14 – это диафрагменная коническая ударная труба с углом раствора 14° спроектированная, изготовленная и введенная в эксплуатацию в АО «НПО Спецматериалов» [14].

Целью данного исследования было обеспечить безосколочное раскрытие диафрагмы выполненной из АМгбМ толщиной 0.5 мм диаметром 84 мм (рабочий диаметр диафрагмы 54 мм) с помощью насечек, нанесенных с помощью лазерной гравировки. Гравировка наносилась глубиной 0.1 мм, 0.2 мм, 0.3 мм согласно рис. 6.

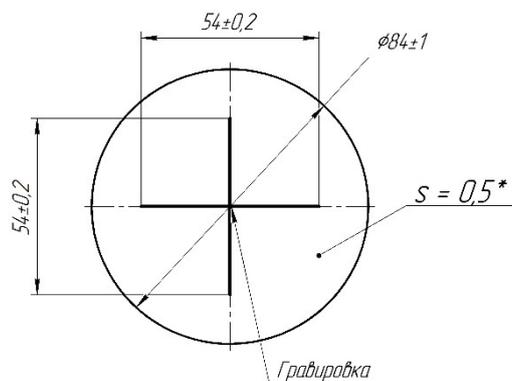


Рис. 6. Схема нанесения лазерной гравировки: s – толщина диафрагмы

Общий вид используемых диафрагм представлен на рис. 7

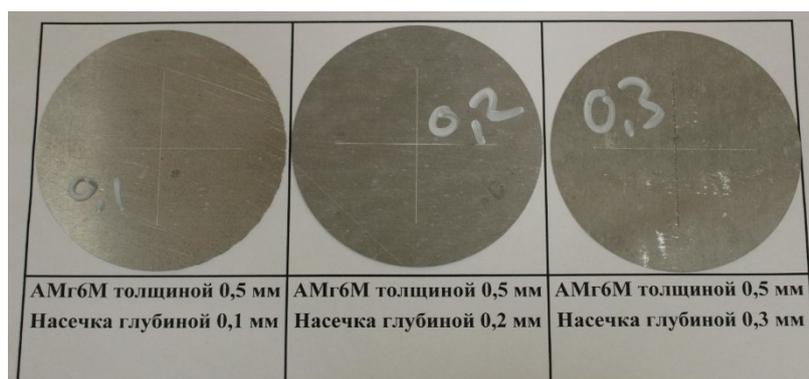


Рис. 7. Диафрагмы используемые в исследовании

Исследуемые диафрагмы, помещаемые между КВД и КНД, теоретически должны были раскрываться, образуя 4 лепестка. Результаты проведенных экспериментов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты эксперимента

№	Материал	Глубина насечки	Давление в КВД при разрыве, МПа	Примечание
1	Лист АМг6М толщиной 0.5 мм	0.1 мм	5.82	Лепестки не раскрылись
2		0.2 мм	4.86	Лепестки не раскрылись
3		0.3 мм	1.4	Раскрытие лепестков
4		0.2 мм	5.25	Лепестки не раскрылись
5		0.3 мм	1.15	Диафрагма не раскрылась полностью
6		0.3 мм	2.95	Лепестки раскрылись и закрутились
7	Лист АМг6М толщиной 0.5 мм	Без насечки	7.5 МПа 8.5 МПа	Происходит отрыв большого осколка по рабочему диаметру диафрагмы

При проведении экспериментов с диафрагмами, где глубина насечки составляла 0.1 ÷ 0.2 мм происходил срез всех лепестков: диафрагма открывалась по одной из насечек, при этом происходил отрыв двух частей диафрагмы. Осколки, образуемые при разрыве диафрагмы, пробивали картон толщиной 0.5 мм, что являлось неудовлетворительным результатом.

При использовании диафрагм с насечками 0.3 мм, отрыва лепестков не происходило, однако не была достигнута требуемая повторяемость эксперимента. Раскрытие диафрагм происходило при давлениях от 1.15 МПа до 2.95 МПа, что может говорить о недостаточной точности гравировки и производственного оборудования. Кроме того, раскрытие диафрагм также происходило по-разному (рис. 8). В 3 опыте произошло раскрытие 4 лепестков, в 5 опыте произошло раскрытие только одной линии насечки, в 6 опыте произошло раскрытие лепестков, частичный их срез, в результате чего лепестки закрутились.

Стоит отметить, что материал АМг6М без насечек также показывает малую повторяемость результатов, так как раскрытие диафрагм происходит при давлениях от 7.5 МПа до 8.5 МПа.



Рис. 8. Раскрытие диафрагм с глубиной насечки 0.3 мм

Немаловажным результатом данного исследования является определение зависимости снижения давления от глубины насечки. При увеличении глубины насечки до половины толщины диафрагмы давление срабатывания снижается на 65 %, что приводит к уменьшению давления фронта, длительности фазы сжатия и импульса фазы сжатия генерируемой ударной волны.

4. Заключение

Анализ литературы, проведенный в первой части данной статьи, показывает, что оптимально изготавливать диафрагмы с глубиной насечки в половину толщины диафрагмы. В качестве разрывных диафрагм обеспечивающий безосколочное раскрытие возможно использовать: хлопающие, разрывные диафрагмы, а также возможно изготавливать специализированные приспособления для разреза диафрагм внутри ударных труб (например, разрезные ножи). Второй вариант наименее предпочтителен, так как ведет к значительному усложнению конструкции ударной трубы.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили результаты, представленные в анализе литературы. Глубина насечки на диафрагме, выполненная в половину толщины диафрагмы, обеспечивает безосколочное раскрытие лепестков для материала АМг6М толщиной 0,5 мм на установке КУТ-14. Аналогично ранее проведенным исследованиям [3–4], наблюдалось значительное снижение давления срабатывания диафрагм, что говорит о необходимости поиска дополнительных материалов для изготовления разрывных диафрагм.

На данный момент подтверждена возможность использования диафрагм из АМг6М для изучения действия ударных волн на легко повреждаемые объекты – биообъекты и макеты головы/торса человека, выполненные в виде тонкой оболочки, наполненной жидкостью на установке КУТ-14 АО «НПО Спецматериалов».

Литература

1. Васильева С. Н., Гук И. В. Ударная труба – инструмент изучения ударно-волновых процессов. Обзор // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2024. № 11–12 (197–198). С. 71–82. DOI 10.53816/23061456_2024_11-12_71
2. Silnikov N. M., Vasilieva S. N., Guk I. V., Medvedev S. P., Khomik S. V. Experimental and numerical study of perforated plates effectiveness to ensure safety in case of emergencies on spacecraft and launch pads // Acta Astronautica. 2023. Vol. 204. Pp. 854–862. – DOI 10.1016/j.actaastro.2022.09.038
3. Сильников М.В., Медведев С.П., Андержанов Э.К., Гук И.В., Иванцов А.Н., Михайлин А.И., Помазов В.С., Тереза А.М., Хомик С.В. Параметры волн давления в конической ударной трубе с учетом динамики разрыва мембраны // Химическая физика. 2022. Т. 41, № 12. С. 56–59. DOI 10.31857/S0207401X2212007X

4. Медведев С. П., Андержанов Э. К., Иванцов А. Н., Ковалева К. И., Тереза А. М., Хомик С. В. Влияние фрагментов мембраны на течение в конической ударной трубе // Лазерные, плазменные исследования и технологии. ЛАПЛАЗ-2021: сборник научных трудов VII международной конференции. Часть 1. Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ". 2021. С. 420–421.
5. Васильева С. Н., Гук И. В. Исследование раскрытия диафрагм в газодинамической установке «КУТ-14» // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Труды XXVI Всероссийской научно-практической конференции. Том 2. Санкт-Петербург: Типография Любавич. 2023. С. 161–165.
6. Васильева С. Н., Гук И. В. Экспериментальное изучение раскрытия диафрагм в газодинамической установке «КУТ-14» // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 9–10 (183–184). С. 140–147. DOI 10.53816/23061456_2023_9-10_140.
7. Гейко И. В. Расчет предохранительных и защитных устройств. Методические рекомендации к практическим занятиям. Нижний Новгород: ФГБОУ НГТУ. 2015. 31 с.
8. Официальный сайт Лаборатории мембранных предохранительных устройств. URL: <https://www.labmpu.ru/membrany> (дата обращения: 25.02.2025)
9. Lee D. W., et al. Effect of rupture disc curvature on the compression waves in S/R valve // Journal of mechanical science and technology. 2008. Vol. 22. Pp. 755–760.
10. Gopinath K., Narayanamurthy V., Rao Y. V. D. Failure Behavior of a Thin Domed Steel Disc with and without Scores Under a Pressure Impulse // Advances in Industrial Machines and Mechanisms: Select Proceedings of IPROMM 2020. 2021. С. 385–391.
11. Волков В. А., Пармон В. А., Ткаченко Б. К. Процесс раскрытия неупругой диафрагмы в ударной трубе // Прикладная механика и техническая физика. 1977. № 4. С. 92.
12. Kaneko W., Ishii K. Effects of diaphragm rupturing conditions on self-ignition of high-pressure hydrogen // International Journal of Hydrogen Energy. 2016. Т. 41. № 25. С. 10969–10975.
13. Qiu W., et al. Investigation of dual ignition for a detonation-driven shock tunnel in forward driving mode // Chinese Journal of Aeronautics. 2020. Vol. 33. No. 5. Pp. 1468–1475.
14. Гук И. В., Помазов В. С. Коническая ударная труба для натурального моделирования действия взрыва // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды XXIII Всероссийской научно-практической конференции Российской академии ракетных и артиллерийских наук (РАРАН). Том 2. Москва: ФГБУ «Российская академия ракетных и артиллерийских наук». 2020. С. 65–69.

References

1. Vasilieva S. N., Guk I. V., Shock tube – a tool for studying shock wave processes. Review, *Issues of Defense Technology. Series 16: Technical Means of Countering Terrorism*, 2024, no. 11–12 (197–198), pp. 71–82 [in Russian]. DOI: 10.53816/23061456_2024_11-12_71
2. Silnikov N. M., Vasilieva S. N., Guk I. V., Medvedev S. P., Khomik S. V., Experimental and numerical study of perforated plates effectiveness to ensure safety in case of emergencies on spacecraft and launch pads, *Acta Astronautica*, 2023, vol. 204, pp. 854–862. DOI 10.1016/j.actaastro.2022.09.038
3. Silnikov M. V., Medvedev S. P., Anderzhanov E. K., Guk I. V., Ivantsov A. N., Mikhailin A. I., Pomazov V. S., Teresa A. M., Khomik S. V., Parameters of Pressure Waves in a Conical Shock Tube Taking into Account the Dynamics of Membrane Rupture, *Chemical Physics*, 2022, vol. 41, no. 12, pp. 56–59 [in Russian]. DOI: 10.31857/S0207401X2212007X
4. Medvedev S. P., Anderzhanov E. K., Ivantsov A. N., Kovaleva K. I., Teresa A. M., Khomik S. V., The influence of membrane fragments on the flow in a conical shock tube, *Laser and plasma research and technologies. LAPLAZ-2021: Proceedings of the 7th international conference. Part 1*. Moscow: National Research Nuclear University MEPhI". 2021, pp. 420–421 [in Russian].

5. Vasilieva S. N., Guk I. V., Study of diaphragm opening in the gas-dynamic installation "KUT-14", *Current Issues of Defense and Security. Proceedings of the 26th All-Russian Scientific and Practical Conference. Volume 2*. St. Petersburg: Lyubavich Printing House, 2023, pp. 161–165 [in Russian].
6. Vasilieva S. N., Guk I. V., An Experimental Study of Diaphragm Opening in the KUT-14 Gas-Dynamic Installation, *Issues of Defense Technology. Series 16: Technical Means of Countering Terrorism*, 2023, no. 9–10 (183–184), pp. 140–147, DOI 10.53816/23061456_2023_9-10_140
7. Geiko I. V., *Calculation of safety and protective devices. Methodological recommendations for practical classes*, Nizhny Novgorod: FSBEI NSTU, 2015, 31 p. [in Russian].
8. The official website of the Laboratory of Membrane Safety Devices.
URL: <https://www.labmpu.ru/membrany> (date of request: 02/25/2025)
9. Lee D. W., et al., Effect of rupture disc curvature on the compression waves in S/R valve, *Journal of mechanical science and technology*, 2008, vol. 22, pp. 755–760. DOI: 10.1007/S12206-008-0101-x
10. Gopinath K., Narayanamurthy V., Rao Y. V. D., Failure Behavior of a Thin Domed Steel Disc with and without Scores Under a Pressure Impulse, In book: *Advances in Industrial Machines and Mechanisms: Select Proceedings of IPROMM 2020*, 2021, pp. 385–391.
DOI: 10.1007/978-981-16-1769-0_35
11. Volkov V. A., Parmon V. A., Tkachenko B. K., The process of opening an inelastic diaphragm in a shock tube, *Applied Mechanics and Technical Physics*, 1977, no. 4, pp. 92.
<https://doi.org/10.1007/BF00851393>
12. Kaneko W., Ishii K., Effects of diaphragm rupturing conditions on self-ignition of high-pressure hydrogen, *Int. J. Hydrog. Energy*, 2016, vol. 41, issue 25, pp. 10969–10975.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.211>
13. Qiu W., et al., Investigation of dual ignition for a detonation-driven shock tunnel in forward driving mode, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, vol. 33, issue 5, pp. 1468–1475.
<https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.01.013>
14. Guk I. V., Pomazov V. S., Conical shock tube for full-scale modeling of explosion effects, *Current issues of protection and safety: Proceedings of the XXIII All-Russian scientific and practical conference of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences (RARAS), vol. 2*, Moscow: Federal State Budgetary Institution "Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences", 2020, pp. 65–69 [in Russian].

Статья поступила в редакцию 2 декабря 2025 г.