

УДК 539.42

Численное моделирование раскрытия мембраны легкогазовой пушки

© 2025 г. М. В. Никульшин, И. В. Минаев, И. В. Смирнова, Д. Т. Юсупов, А. И. Кленов

¹ Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина, Снежинск, 456770, Россия

Для исследования динамических свойств материалов чаще всего используется ударно-волновое нагружение, что позволяет изучать сжимаемость, фазовые превращения и ряд других явлений, происходящих в области высоких давлений и температур. В качестве систем ударно-волнового нагружения, как правило, используются взрывные нагружающие устройства и легкогазовые пушки. Проведены численные оценки величины давления раскрытия (разрушения) алюминиевых мембран в камере высокого давления пневматической легкогазовой пушки. Результаты расчета сравниваются с данными экспериментов. Расчетно-экспериментальные исследования проводились с целью получения величин разрушающего давления для партии мембран, отличающихся геометрией (толщиной и высотой непрорезной части), так как знание предельных нагрузок мембран позволяет прогнозировать давление в камере высокого давления и ускорение метаемого объекта. Дополнительно рассмотрено влияние на величину раскрытия давления мембран ряда факторов: механических свойств материала мембраны, количества насечек-концентраторов напряжений на поверхности мембраны, формы насечек и т.д. В результате проведенных расчетов показано, что основным фактором, влияющим на разброс давления раскрытия мембраны, являются свойства материала. Для уменьшения разброса давления раскрытия мембран необходимо проводить контроль свойств материала или использовать материал с более стабильными механическими свойствами. Выводы подтверждены сопоставлением результатов испытаний мембран и численных расчетов. Увеличение толщины мембраны при постоянной глубине насечек приводит к снижению давления раскрытия мембран и связано с ростом концентрации напряжений в радиальных насечках, что подтверждено экспериментальными данными.

Ключевые слова: мембрана, легкогазовая пушка, давление раскрытия, расчет, эксперимент.

Постановка задачи

Эффективным способом исследования сжатия конструкционных материалов при высоких давлениях и температурах считается динамическое нагружение. В качестве систем ударно-волнового нагружения используются взрывные нагружающие устройства и различные виды пушек, в том числе пневматические легкогазовые пушки (ЛГП) [1]. Метательные установки данного типа иногда называют баллистическими ударными трубами. В качестве рабочего газа в них обычно используют сжатый гелий или сжатый воздух. Несомненным преимуществом пневматических установок перед другими ускорителями является простота ее обслуживания и безопасность эксплуатации. В РФЯЦ-ВНИИТФ используются ЛГП калибра 44 мм (рис. 1) [2]. Установка состоит из камеры высокого давления (КВД), ствола баллистического, мембранного узла, камеры измерительной и камеры демпферной. Калибр ствола – 44 мм, длина – 6 м.

✉ М.В. Никульшин: M.V.Nikulshin@vniitf.ru

Поступила в редакцию: 02.10.2024

После доработки: 17.01.2025

Принята к публикации: 11.02.2025



Рис. 1. ЛГП калибра 44 мм

Камера высокого давления отделена от ствола мембраной, толщина которой подбирается исходя из требуемого значения давления в ней. Разрушение мембраны осуществляется посредством набора определенного давления в КВД, после чего сжатый газ ускоряет метаемый объект (МО) по баллистическому стволу в направлении измерительного узла. Предварительно, перед накачкой легкого газа в КВД, баллистический ствол вакуумируется через испытательный отсек, в котором расположен измерительный узел с исследуемым материалом и типовыми методиками регистрации быстропротекающих процессов.

Расчетно-экспериментальные исследования проводились с целью получения величин разрушающего давления для партии мембран, отличающихся геометрией (толщиной (S) и высотой непрорезной части (h)), так как знание предельных нагрузок мембран позволяет прогнозировать давление в КВД и ускорение МО. В ЛГП разработки РФЯЦ-ВНИИТФ используются разрывные мембраны с S от 3 до 7 мм. На одной из поверхностей мембран выполнено четыре диаметральные насечки под углом 45° друг к другу и глубиной насечек примерно 1 мм (рис. 2). Материал мембран – алюминиевый сплав АМц М ГОСТ 21631-76¹.

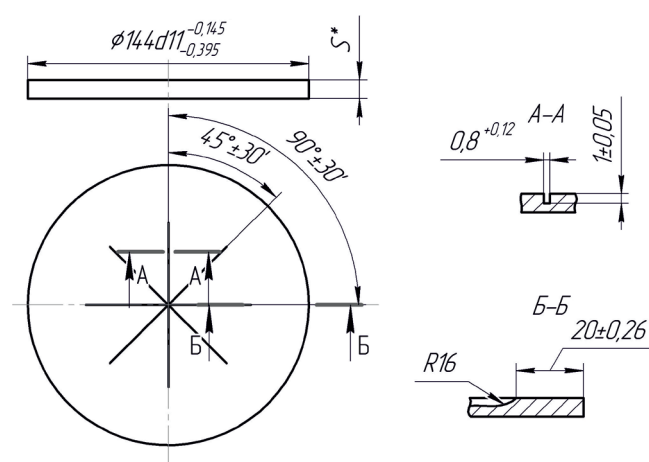


Рис. 2. Схема мембраны

Результаты экспериментов, представленные в табл. 1, показали, что мембраны, имеющие примерно одинаковые размеры (S и h), имеют различное давление раскрытия (отличие может составлять 15 %).

Типовая мембрана до и после выстрела показана на рис. 3.

Целью данной работы является численное решение задачи по определению давления раскрытия мембран, отличающихся геометрическими параметрами (S и h), с последующим сопоставлением ре-

¹ ГОСТ 21631-76. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия.

Таблица 1. Экспериментальные данные давления раскрытия мембраны разной толщины

Геометрические размеры мембраны		Давление, МПа
S , мм	h , мм	
3.0	1.95	5.1–5.2
3.0	1.9	4.8
3.85	2.8	6.9
3.85	2.88	7.8
5.0	4.0	11.4–12.7
4.87	3.99	12.7
4.90	3.99	12.0
5.8	5.1	17.7
5.84	5.05	17.4

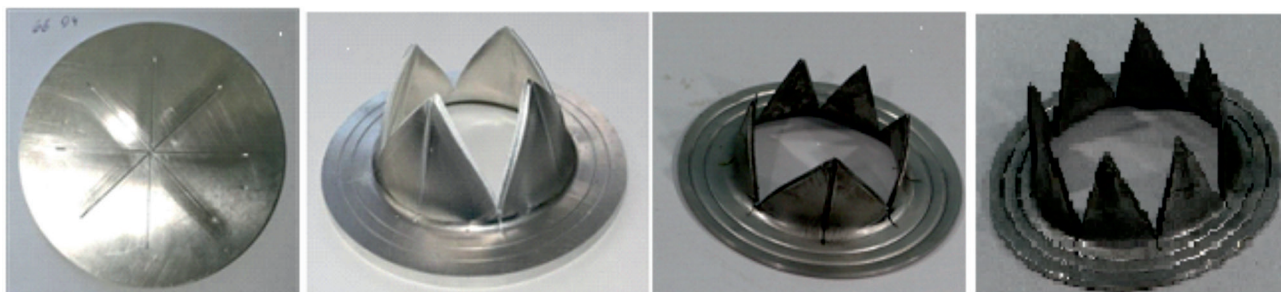


Рис. 3. Характерный вид мембраны до и после выстрела

зультатов, полученных при испытаниях, а также исследование влияния некоторых параметров (свойств материала, количества насечек на поверхности мембраны и вида насечек) на величину давления раскрытия мембран.

Описание расчетной модели

При проведении численных оценок используется трехмерная расчетная модель мембраны в виде сектора с углом 45° . Характерный размер восьмиузлового конечного элемента сетки равен 0.2 мм. Силовое взаимодействие между деталями моделируется с помощью контактных элементов. Мембраны выполнены из алюминиевого сплава АМц М, выбор которого обусловлен его высокой пластичностью. Механические характеристики сплава АМц М приведены в табл. 2 [3–7].

Мембрана моделировалась изотропным упругопластическим материалом, который позволяет задавать разные значения предела текучести для сжатия и растяжения в зависимости от пластической деформации. В расчетах задавались истинные диаграммы растяжения и сжатия материала АМц М [8–11]. В качестве критерия разрушения принималось достижение относительного удлинения материала после разрыва (δ).

Таблица 2. Механические характеристики сплава АМц М [3–7]

E , МПа	Растяжение		Сжатие		δ , %
	σ_t , МПа	σ_b , МПа	σ_t , МПа	σ_b , МПа	
$0.7 \cdot 10^5$	47–58.9	90–150	110–118.6	160–180	20–23

Примечание. E – модуль упругости материала; σ_t – предел текучести при растяжении и сжатии; σ_b – предел прочности при растяжении и сжатии; δ – относительное удлинение после разрыва.

Верификация расчетной модели проведена на сплошной мембране (без насечек), для которой существует приближенное аналитическое решение. Аналитическая оценка определения давления раскрытия мембраны осложняется тем, что на его величину оказывает влияние ряд параметров: толщина (допуск на толщину) мембраны, свойства материала, температура и т.д. При известных толщине, диаметре и материале можно определить весьма ориентировочно среднее давление раскрытия мембраны, а предельные значения – неизвестны [12, 13].

Аналитическую оценку давления раскрытия сплошных мембран проведем по формуле [13]:

$$P = \frac{8 \cdot S \cdot K_t \cdot \sigma_B}{D \cdot \sqrt{\frac{1+\delta}{\sqrt{1+\delta}-1}}},$$

где S – толщина мембраны (рис. 1), мм; K_t – температурный коэффициент; σ_B – предел прочности при растяжении материала; D – диаметр мембраны; δ – относительное удлинение материала после разрыва.

В табл. 3 приведены толщины рассматриваемых сплошных мембран, а также величины давления раскрытия, полученные численным и аналитическим путем.

Таблица 3. Результаты расчетов и аналитической оценки давления раскрытия сплошной мембраны

Параметры	Давление, МПа				
Толщина мембраны S , мм	1	2	3	4	5
Численная оценка	2.8	5.7	8.5	11.3	14.2
Аналитическая оценка*	2.6	5.2	7.8	10.4	13

* В расчетах принято: $K_t=1$ при температуре среды 20° , [13]; $\sigma_B=120$ МПа; $\delta=20\%$.

Отличие величины давления не превышает 10 %, что позволяет применить данный подход для численных оценок давления раскрытия мембран с насечками.

В [14, 15] предложена зависимость давления разрушения восьмилепестковой мембраны в зависимости от ее геометрических и прочностных параметров. Данная зависимость справедлива при отношении $S/D=0.01-0.08$, и $h=0.1-1.2$ мм. В расчетно-экспериментальных исследованиях участвуют мембраны с отношением $S/D=0.03-0.06$ и $h=1.95-3.99$ мм, что не позволяет использовать данную зависимость для аналитической оценки давления разрушения рассматриваемых мембран.

Исследование влияния некоторых параметров на величину давления раскрытия мембран

В табл. 4 приведены геометрические параметры рассматриваемых мембран, давления раскрытия мембран, полученные численным путем и в экспериментах. Результаты расчетов показали, что отличие численных оценок и экспериментальных данных составляет от 5 до 40 %.

Таблица 4. Сравнение давления раскрытия мембраны по результатам расчетов и экспериментов

Варьируемые геометрические размеры мембраны		Расчетное давление P , МПа	Экспериментальное давление $P_{\text{эк}}$, МПа
S , мм	h , мм		
5.0	4.0	11.6	11.2–12.2
3.85	2.88	7.1	7.8
3.85	2.8	6.7	6.3
3.0	1.95	3.8	5.1–5.2

Влияние механических характеристик материала мембраны

В табл. 5 приведены рассматриваемые механические характеристики материала и варьируемые геометрические размеры мембраны, а также приводятся давления раскрытия мембран, полученные численным путем. Результаты расчетов показывают, что давление раскрытия мембран прямо пропорционально величинам, характеризующим механические свойства материала. Отличие величин давления раскрытия мембран может составлять 1.6 раз в зависимости от заданных свойств материала в расчете, а от экспериментально полученных давлений отличаться в 0.8–1.45 раза.

Таблица 5. Результаты расчетов

Механические свойства материала мембраны при растяжении			Варьируемые геометрические размеры мембраны	
			$S=5$ мм, $h=4$ мм	$S=3.85$ мм, $h=2.8$ мм
σ_t , МПа	σ_b , МПа	Давление раскрытия мембраны, МПа		
$\delta=20\%$	47	90	8.4	4.9
	47	110	10.7	6.2
	47	120	11.6	6.7
	49	127	12.1	7.5
	58	140	13.4	8.3
$\delta=23\%$	47	90	8.9	5.3
	47	110	11.1	6.6
	47	120	12.0	7.3
	49	127	12.8	7.8
	58	140	13.9	8.6
$P_{\text{экс}}$, МПа			11.2–12.2	6.3

Влияние допуска на толщину мембраны

Расчеты проводились для мембран с постоянной $h=4$ мм, в которых варьировалась толщина мембраны от 4.85 до 5.0 мм. На рис. 4 представлена зависимость давления раскрытия мембраны от допуска на толщину мембраны. Результаты расчетов показали незначительный разброс давления (примерно 4 %), что говорит о несущественном влиянии допуска на толщину мембраны на давление ее раскрытия.

Отметим, что с увеличением толщины мембраны S при $h=\text{const}$ давление раскрытия мембраны уменьшается (рис. 4), что связано с увеличением концентрации напряжений в радиальных насечках.

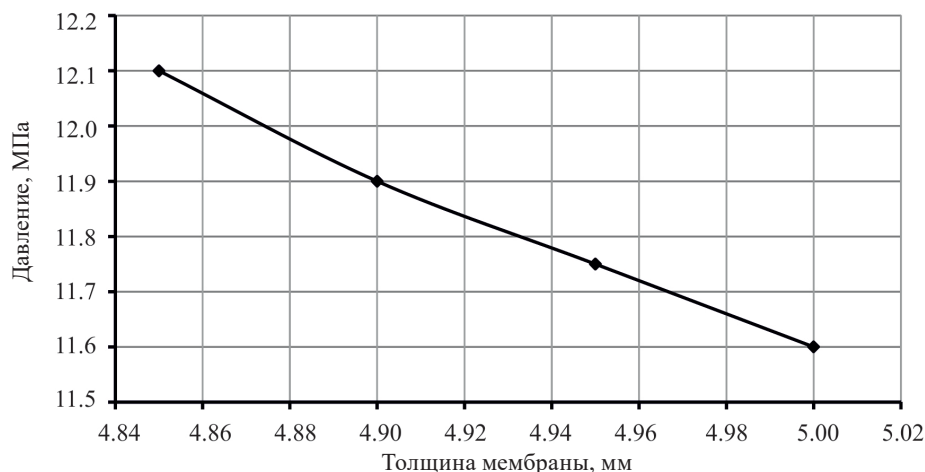


Рис. 4. Зависимость давления раскрытия мембраны от допуска на толщину мембраны

Данный результат подтверждается экспериментально (табл. 1), а также отмечается в [16]. Согласно [16], равномерное и полное раскрытие мембран с радиальными насечками достигается при отношении $h/S=0.5-0.6$. Результаты расчетов, представленные на рис. 5, показали, что мембрана работает более стабильно при отношении $h/S=0.5-0.75$, что требует экспериментального подтверждения.

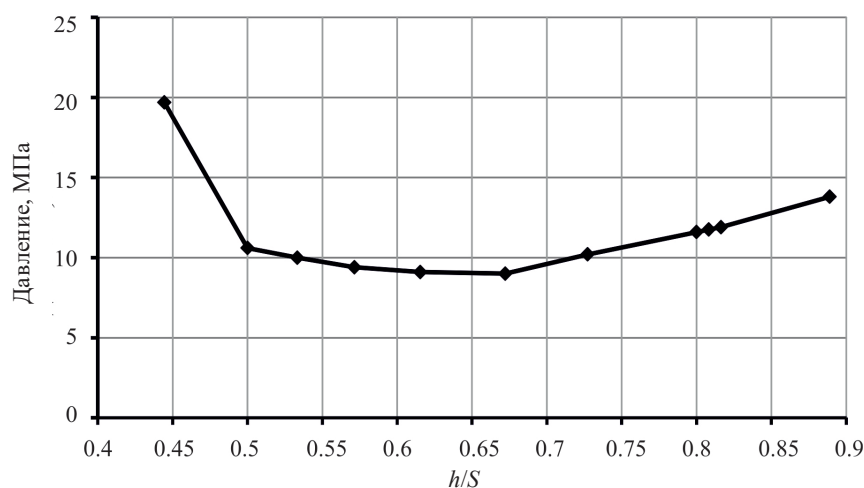


Рис. 5. График зависимости давления от отношения h/S

Влияние формы насечек

Влияние формы насечек на давление раскрытия мембран проводилось для мембран с V-образной и прямоугольной формой насечки (рис. 6).

Результаты расчетов показали несущественный разброс величины давления раскрытия мембраны (менее 5 %), что согласуется с результатами ранее проведенных работ по оценке влияния различных форм концентратора (полукруглой, U-образной и V-образной) на величину разрушающего давления трубы с надрезом. Таким образом, форма концентратора практически не влияет на величину разрушающего давления в зоне разрушения.

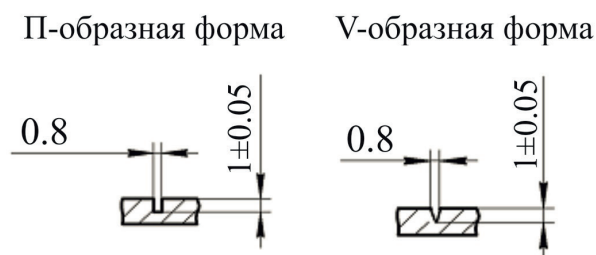


Рис. 6. Рассматриваемые формы насечек

Влияние количества радиальных насечек

Наиболее распространенными являются мембраны с двумя, тремя или четырьмя насечками на поверхности (рис. 7) [12, 16]. При оценке влияния количества насечек на работоспособность мембраны расчеты проводились для мембраны с геометрическими параметрами $S = 5$ мм и $h = 4$ мм.

На рис. 8 представлена зависимость давления раскрытия мембраны от количества насечек. Разброс давления не превышает 5 %, что говорит о незначительном вкладе данного параметра в давление раскрытия мембраны. Мембрана с двумя радиальными насечками раскрывается более равномерно [10].

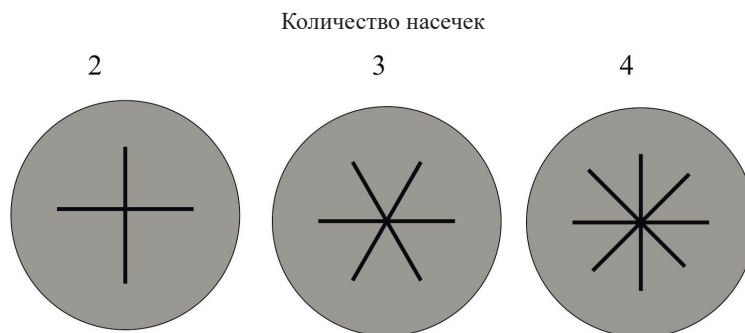


Рис. 7. Расчетные варианты



Рис. 8. Зависимость давления раскрытия мембраны от количества насечек

Мембрана с круговой насечкой

Среди разрывных мембран находят применение как мембраны с радиальными насечками, так и мембраны с круговыми насечками (рис. 9) [12, 16]. Мембрана с радиальными насечками проще в изготовлении [12, 16], однако при срабатывании она разрывается по одной-двум насечкам (или через одну насечку), и не происходит полного раскрытия мембраны (рис. 3). В этом смысле круговые насечки предпочтительнее, так как имеют более высокую точность срабатывания [12] и раскрываются полностью [13].

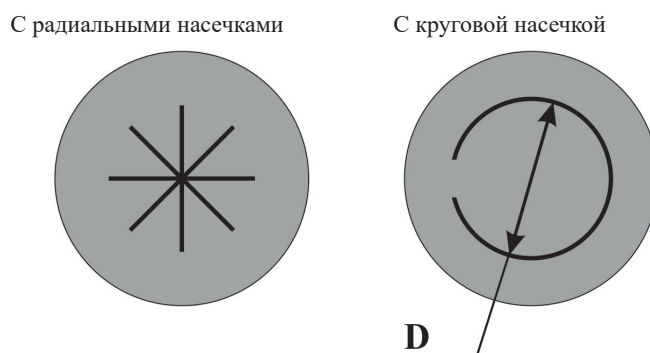


Рис. 9. Виды разрывных мембран

В ходе работы проведены численные оценки давления раскрытия мембран с круговой насечкой для различных рабочих диаметров (D) (рис. 9). Рассматривалась мембрана $S = 5$ мм и $h = 4$ мм, форма насечки – прямоугольная, материал АМц М. Результаты расчетов показали существенный разброс давления раскрытия мембран в зависимости от заданного ее рабочего диаметра (табл. 6). С увеличением рабочего диаметра в 1.5 раза (с 60 до 90 мм) давление раскрытия мембран увеличивается

Таблица 6. Результаты расчетов давления раскрытия в зависимости от диаметра круговой насечки

Рабочий диаметр (D), мм	60	80	90
Давление, МПа	8.5	12.7	14.9

в 1.7 раза. Разброс механических характеристик материала мембран приводит к существенному отличию величин давления раскрытия и может составлять 1.7 раза.

Заключение

В работе представлено расчетное исследование давления раскрытия мембран из алюминиевого сплава АМц М ГОСТ 21631-76, а также влияния ряда факторов на его величину.

В результате проведенных расчетов показано, что основным фактором, влияющим на разброс давления раскрытия мембраны, являются свойства материала. Для уменьшения разброса давления раскрытия мембран необходимо проводить контроль свойств материала или использовать материал с более стабильными механическими свойствами. Выводы подтверждены сопоставлением результатов испытаний мембран и численных расчетов.

Увеличение толщины мембраны при постоянной глубине насечек приводит к снижению давления раскрытия мембран, связано с ростом концентрации напряжений в радиальных насечках и подтверждено экспериментальными данными.

Финансирование

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

Конфликт интересов

Конфликт интересов отсутствует.

Вклад авторов

Никульшин М.В. – формулировка идеи и целей исследования, постановка задачи, редактирование текста статьи;

Минаев И.В. – разработка концепции исследования, анализ экспериментальных данных, участие в проведении расчетов, обсуждении результатов, выявление закономерностей в исследованиях, редактирование текста статьи, подготовка заключения;

Смирнова И.В. – проведение численных расчетов, обработка результатов исследования, выявление закономерностей в исследованиях, анализ экспериментальных данных, подбор литературных источников, подготовка текста статьи;

Юсупов Д.Т. – формулировка идеи и целей исследования, постановка эксперимента;

Кленов А.И. – формулировка целей исследования, постановка эксперимента, выполнение экспериментальных работ, выполнение измерений, подбор литературных источников.

Список литературы

1. Новиков Л.С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты: Учебное пособие. М.: Университетская книга, 2009. 104 с.
2. Гармашев А.Ю., Кленов А.И., Смирнов Е.Б., Юсупов Д.Т. Двухступенчатая легкогазовая пушка для изучения свойств веществ при высокоинтенсивных процессах. РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина, Снежинск // Сб. докладов и тезисов ВРЦ РАРАН, 2018. г. Саров.
3. Хоришкина Г.П., Михайлов Н.Я., Учаев А.А. Физико-механические свойства конструкционных материалов и некоторые современные методы их исследования: Справочное пособие. М.: ЦНИИАтоминформ, 1982. 239 с.
4. Авиационные материалы: Справочник в 9 т. Алюминиевые и бериллиевые сплавы / Под ред. Р.Е. Шалина. М.: Машиностроение, 1982. Т. 4. 625 с.

5. Материалы в машиностроении. Выбор и применение. Т. 1. Цветные металлы и сплавы: Справочник / Под ред. Л.П. Лужникова. М.: Машиностроение, 1997. 304 с.
6. Цветные металлы и сплавы: Справочник. Н. Новгород: Вента-2, 2001. 278 с.
7. Александров В.Г., Базанов Б.И. Справочник по авиационным материалам и технологии их применения. М.: Транспорт, 1979. 263 с.
8. Козаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.
9. Надаи А. Пластичность. М: ОНТИ, 1936. 280 с.
10. Бакуменко В.И. Краткий справочник конструктора нестандартного оборудования. Т. 1. М.: Машиностроение, 1997.
11. Teng X., et al. Numerical prediction of fracture in the Taylor test // International Journal of Solids and Structures. V. 42. Iss. 9. P. 2929–2948.
12. Ольховский Н.Е. Предохранительные мембраны для защиты оборудования в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. М.: Химия, 1970. 176 с.
13. Водяник В.И., Малахов Н.Н., Полтавский В.Т., Шелюк И.П. Предохранительные мембраны: Справочное пособие. М.: Химия, 1982. 144 с.
14. Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Каныгин И.И., Лапичев Н.В. Расчетно-экспериментальные исследования раскрытия лепестковых разрывных диафрагм легкогазовых баллистических установок // Вестник научно-технического развития, 2015. № 10 (98). С. 3–12.
15. Герасимов С.И., Ерофеев В.И., Каныгин И.И., Лапичев Н.В., Никитина Е.А. Исследование раскрытия лепестковых разрывных диафрагм легкогазовых баллистических установок // Приволжский научный журнал, 2015. № 4. С. 9–20.
16. Ольховский Н.Е. Предохранительные мембраны. М.: Химия, 1976. 152 с.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2025, vol. 14, no. 2, pp. 131–140

Numerical simulation of light-gas gun membrane opening

M. V. Nikulshin [✉], I. V. Minaev, I. V. Smirnova¹, D. T. Yusupov, A. I. Klenov

¹Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics», Snezhinsk, 456770, Russia

[✉]M.V.Nikulshin@vniitf.ru

Received October 02, 2024; revised January 17, 2025; accepted February 11, 2025

Shock-wave loading is the most commonly used way to study the dynamic properties of the materials since this permits the investigation into compressibility, phase transformations, and some other phenomena that take place in the high-pressure and high-temperature region. Explosive loading devices and light-gas guns are usually used as the shock-wave loading systems. The paper presents numerical evaluations of aluminum membrane opening (destruction) pressure in the high-pressure chamber of the pneumatic light-gas gun. The calculation results are compared with the experimental data. The simulations and experiments were aimed to evaluate the destruction pressure for a batch of membranes having different geometry, i.e. thickness and height of the unnotched part, because the data on the membrane load limits helps predict the pressure in the high-pressure chamber and the flyer acceleration. Besides, the effect of some factors on the membrane opening pressure is considered such as mechanical properties of the membrane material, the number of notches, i.e. stress concentrators on the membrane surface, the shape of notches, etc. The simulations demonstrated that the main factor affecting the spread in the membrane opening pressures is the material properties. To reduce this spread, one should

control the material properties and choose the materials with more stable mechanical properties. The conclusions were validated by comparing the membrane testing data with the simulated results. At constant notch depth, the increase in membrane thickness reduces the membrane opening pressure due to higher stress concentration in the radial notches, as evidenced by the experimental data.

Keywords: membrane, light-gas gun, opening pressure, calculation, experiment.

References

1. *Novikov L.S.* Vozdejstvie tverdyh chastic estestvennogo i iskusstvennogo proiskhozhdeniya na kosmicheskie apparaty. Uchebnoe posobie [Effect of solid particles of natural and artificial origin on space vehicles. Educational book]. Moscow, Universitetskaya kniga Publ., 2009. 104 p. (in Russian).
2. *Garmashev A.Yu., Klenov A.I., Smirnov E.B., Yusupov D.T.* Dvuhstupenchataya legkogazovaya pushka dlya izucheniya svoystv veshchestv pri vysokointensivnyh processah [Two-stage light-gas gun for studying substance properties in high-intensity processes]. FSUE «RFNC – VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin», Snezhinsk, Russia. Proceedings of VRC RARAS 2018, Sarov (in Russian).
3. *Khorshkina G.P., Mikhailov N.Ya., Uchaev A.A.* Fiziko-mekhanicheskie svoystva konstrukcionnykh materialov i nekotorye sovremennyye metody ih issledovaniya: Spravochnoe posobie. [Physical and mechanical properties of structural materials and some up-to-date research methods: Reference Guide]. Moscow, CSRIatominform Publ., 1982. 239 p. (in Russian).
4. *Aviacionnye materialy: Spravochnik v 9 tomah. Alyuminievye i berillievye splavy / Pod red. S.Halina R.E.* [Aviation materials: Reference book in 9 volumes. Aluminum and beryllium alloys. Edited by Shalin R.E.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. Vol. 4. 625 p. (in Russian).
5. *Materialy v mashinostroenii. Vybory i primeneniye. T.1. Cvetnye metally i splavy: Spravochnik / Pod red. Luzhnikova* [Materials in machine engineering. Choice and applications. Vol. 1. Nonferrous metals and alloys: Reference book. Edited by Luzhnikov L.P.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1997. 304 p. (in Russian).
6. *Cvetnye metally i splavy. Spravochnik* [Nonferrous metals and alloys: Reference book]. Nizhny Novgorod, Venta-2 Publ., 2001. 278 p. (in Russian).
7. *Aleksandrov V.G., Bazanov B.I.* Spravochnik po aviacionnym materialam i tekhnologii ih primeneniya. [Handbook of aircraft materials and their application technology]. Moscow, Transport Publ., 1979. 263 p. (in Russian).
8. *Kogaev V.P., Makhutov N.A., Gusenkov A.P.* Raschety detalej mashin i konstrukcij na prochnost' i dolgovechnost'. [Calculations of machine and structural components for strength and durability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 224 p. (in Russian).
9. *Nadai A.* Plastichnost'. [Plasticity]. Moscow, ONTI Publ., 1936. 280 p. (in Russian).
10. *Bakumenko V.I.* Kratkij spravochnik konstruktora nestandartnogo oborudovaniya [Quick-reference book of a designer of nonstandard equipment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1997. Vol. 1 (in Russian).
11. *Teng X., et al.* Numerical prediction of fracture in the Taylor test. International Journal of Solids and Structures. Vol. 42. Iss. 9. Pp. 2929–2948.
12. *Olkhovsky N.E.* Predokhranitel'nye membrany dlya zashchity oborudovaniya v himicheskoy, neftekhimicheskoy i neftepererabatyvayushchej promyshlennosti [Safety diaphragms for protection of equipment in chemical, petrochemical and oil refining industries]. Moscow, Chemistry Publ., 1970. 176 p. (in Russian).
13. *Vodyanik V.I., Malakhov N.N., Poltavsky V.T., Shelyuk I.P.* Predokhranitel'nye membrany. Spravochnoe posobie. [Safety diaphragms Reference book]. Moscow, Chemistry Publ., 1982. 144 p. (in Russian).
14. *Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kanygin I.I., Lapichev N.V.* Raschetno-eksperimental'nye issledovaniya raskrytiya lepestkovykh razryvnykh diafragm legkogazovykh ballisticheskikh ustanovok [Computational-experimental investigations in opening of petal-type burst diaphragms in light-gas ballistic installations]. Vestnik nauchno-technicheskogo razvitiya, 2015. No. 10 (98). Pp. 3–12 (in Russian).
15. *Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kanygin I.I., Lapichev N.V., Nikitina E.A.* Issledovanie raskrytiya lepestkovykh razryvnykh diafragm legkogazovykh ballisticheskikh ustanovok [Investigations in opening of petal-type burst diaphragms in light-gas ballistic installations]. Privolzhsky nauchnyi zhurnal, 2015, No. 4. Pp. 9–20 (in Russian).
16. *Olkhovsky N.E.* Predokhranitel'nye membrany [Safety diaphragms]. Moscow, Chemistry Publ., 1976. 152 p. (in Russian).