

УДК 533.6.07

ПАРАМЕТРЫ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ В КОНИЧЕСКОЙ УДАРНОЙ ТРУБЕ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ РАЗРЫВА МЕМБРАНЫ

© 2022 г. С. П. Медведев^{1*}, А. Н. Иванцов¹, Э. К. Андержанов¹, А. М. Тереза¹,
С. В. Хомик¹, Т. Т. Черепанова¹

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук,
Москва, Россия

*E-mail: podwal_ac@yahoo.com

Поступила в редакцию 29.06.2022;
после доработки 12.07.2022;
принята в печать 20.07.2022

На основе экспериментов с использованием конической ударной трубы разработана и апробирована методика исследования ударно-волнового и осколочного действия при разрыве емкости под давлением. Выявлена взаимосвязь интенсивности формирующихся ударных волн с типом раскрытия мембраны, моделирующей разрушающуюся оболочку. Показано, что при разрыве без образования осколков формируются ударные волны большей интенсивности, чем в противном случае, когда часть энергии сжатого газа расходуется на разрыв мембраны и ускорение фрагментов.

Ключевые слова: коническая ударная труба, ударная волна, фугасное действие, осколочное действие, разрывная мембрана.

DOI: 10.31857/S0207401X2212007X

ВВЕДЕНИЕ

Газонаполненные сосуды и резервуары под давлением широко используются в различных сферах промышленности и транспорта. В результате нерасчетного режима рабочего процесса или при внешнем механическом воздействии может произойти разрыв оболочки сосуда высокого давления (СВД). В такой аварийной ситуации персонал и окружающие объекты подвергаются воздействию ударных волн (УВ) и высокоскоростных фрагментов оболочки. Исторически разлет СВД рассматривали с точки зрения аналогии со сферическим взрывом конденсированного взрывчатого вещества. Наиболее удобными моделями сферического СВД оказались тонкостенные хрупкие сферы, выполненные, как правило, из стекла. Эксперименты на установке такого типа впервые описаны в работах [1–3]. Основной целью этих работ было исследование поля течения при разрыве сферической оболочки с помощью оптических методов. В [1–3] стеклянные сферы радиусом от 12.7 до 63.5 мм заполнялись воздухом, гелием или гексафторидом серы SF₆ до давления разрыва 2.1–2.8 МПа.

Подробная картина поля давления получена в работах [4, 5], где с помощью ножевых пьезоэлектрических датчиков давления исследовался разлет стеклянных сфер радиусом 25.5 мм, заполняемых воздухом или аргоном при давлении разры-

ва 1.0–5.2 МПа. Ограниченность экспериментов из [1–5] проявляется в невозможности варьировать материал оболочки СВД. Между тем динамика разрыва хрупкой стеклянной оболочки значительно отличается от практически важного случая упругопластического материала, каковым является металл. Отдельные эксперименты с металлическими оболочками описаны в работе [6]. При этом обычно рассматривается задача о разрыве на два одинаковых фрагмента полусферической формы [6, 7].

Результаты экспериментов в работах [1–6] используются для валидации расчетных моделей формирования УВ и высокоскоростных фрагментов [5, 8]. Как правило, в методиках расчета принимаются определенные упрощения, в частности предположение о мгновенном разрыве оболочки. Учет конечного времени формирования осколка необходим для реалистичного количественного описания как его собственной динамики, так и ударно-волнового действия. Актуальным для разработки как средств защиты от взрыва, так и расчетных моделей является создание экспериментальных методик, воспроизводящих аварийную ситуацию в контролируемых лабораторных условиях. В работах [9, 10] продемонстрирована эффективность использования конической ударной трубы (КУТ) для воспроизведения ударной волны, формирующейся при разрыве сферического

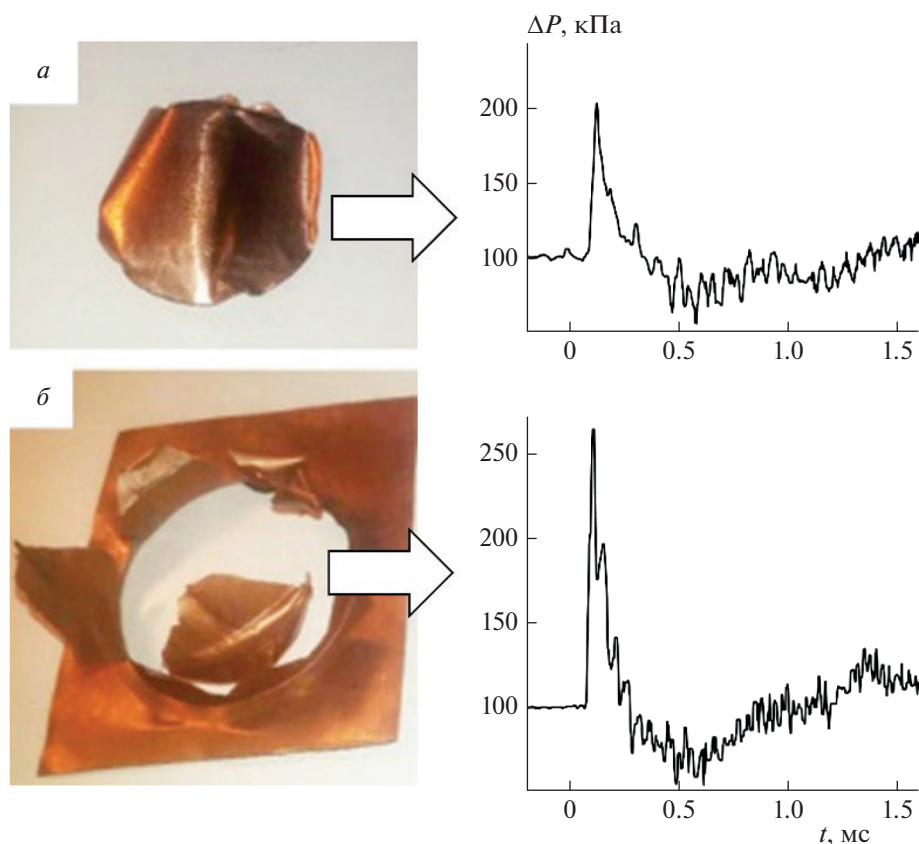


Рис. 1. Типы разрыва мембраны и профили давления УВ: *a* — с образованием фрагмента, Cu-0.3(н); *б* — без фрагмента, Cu-0.15(о).

СВД. В отличие от экспериментов из [1–5] в КУТ используются разрывные мембраны из металлической фольги.

Цель данной работы — определение параметров УВ с учетом динамики разрыва мембраны, которая моделирует элемент оболочки сферического СВД.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проведены в вертикально расположенной конической ударной трубе КУТ-38 с углом раствора 38° . Установка представляет собой укороченный вариант КУТ, описанной в работах [9, 10]. Коническая камера высокого давления (КВД) с образующей длиной $r_0 = 67$ мм отделена от конической камеры низкого давления (КНД) разрывной мембраной из алюминиевой или медной фольги. Вдоль образующей КНД установлены пьезоэлектрические датчики динамического давления ЛХ-610 на относительных расстояниях $r/r_0 = 2.31, 2.91$ и 3.43 . Расстояние по оси КУТ от мембраны до открытого среза КНД равно 140 мм. Камера высокого давления заполняется толкающим газом — азотом или гелием. Раз-

рывные мембраны изготавливались из медной или алюминиевой фольги толщиной $h = 0.1–0.3$ мм. Давление разрыва мембраны p_1 измеряли манометром. Камера низкого давления сообщается с атмосферой — воздухом при давлении $p_0 = 0.1$ МПа.

Испытания разрывных мембран, изготовленных из медной фольги, показали, что предварительная термическая обработка (“отжиг” с помощью газовой горелки) влияет на динамику их разрыва. Неотожженная мембрана разрывается по контуру уплотнения алюминиевой кольцевой прокладкой. В результате формируется одиночный фрагмент, показанный на рис. 1*a*, который движется под действием разности давления между истекающим из КВД газом и окружающей средой. Мембрана из отоженной фольги раскрывается без образования фрагментов и имеет форму распустившегося цветка с несколькими лепестками (рис. 1*б*). Такая же картина наблюдается при использовании алюминиевой фольги. В табл. 1 приведены характеристики используемых мембран, в том числе масса M образующегося фрагмента.

Таблица 1. Характеристики используемых мембран

Обозначение мембран	Материал фольги	h , мм	p_1 , МПа	Число фрагментов	M , г
Cu-0.3(н)	неотожженная медь	0.3	2.3 ± 0.1	1	5.2
Cu-0.15(о)	отожженная медь	0.15	2.3 ± 0.1	0	—
Cu-0.15(н)	неотожженная медь	0.1	1.1 ± 0.07	1	2.4
2Al-0.1	алюминий (2 слоя)	0.2	1.1 ± 0.07	0	—
Cu-0.1(н)	неотожженная медь	0.1	0.67 ± 0.05	1	1.7
Al-0.1	алюминий (1 слой)	0.1	0.67 ± 0.05	0	—

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из табл. 1, удается подобрать пары материалов фольги, которые при приблизительно одинаковом давлении разрыва различаются типом разрыва. Это открывает возможность прямого сравнения параметров ударных волн, формирующихся в различных условиях при фиксированном давлении p_1 . Стрелками на рис. 1а, б показаны записи давления, соответствующие двум типам разрыва мембраны при разлете гелия. Из рис. 1а видно, что при наличии летящего фрагмента избыточное давление в фазе сжатия ударной волны p_{S1} в 1.3 меньше, чем в случае рис. 1б. Для интерпретации этого эффекта можно воспользоваться результатами расчетов из работы [11]. Тип раскрытия мембраны существенно влияет на картину течения в КУТ. В первом случае истечение газа из КВД тормозится фрагментом, что особенно сказывается

на начальной стадии, когда его площадь сравнима с поперечным сечением КНД. Обтекание фрагмента дополнительно усложняет картину течения. В результате формируется УВ меньшей интенсивности, чем во втором случае, когда отгибающиеся лепестки мембраны полностью открывают сечение. При этом картина течения и параметры УВ приближаются к рассчитанным в предположении мгновенного раскрытия мембраны.

Для анализа влияния типа раскрытия мембраны, а также свойств толкающего газа полезно представить измеряемые величины избыточного давления p_{S1} и импульса фазы сжатия УВ i_{S1} в безразмерных координатах [5], определенных следующим образом: $P_{S1} = p_{S1}/p_0$ — безразмерное давление; $I_{S1} = i_{S1}/i_0$ — безразмерный импульс фазы сжатия, где $i_0 = p_0^{2/3} E^{1/3} a_0^{-1}$. Здесь a_0 — скорость звука в окружающей среде (воздухе); E — энергия

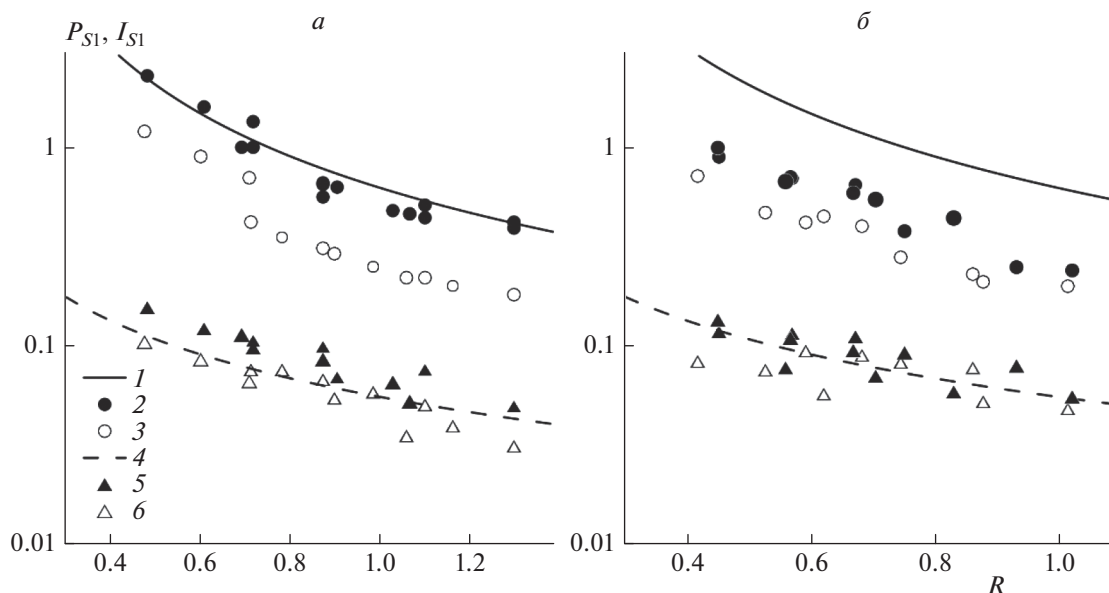


Рис. 2. Сравнение результатов измерения давления и импульса фазы сжатия УВ: а — гелий, б — азот; 1 — давление при взрыве заряда ТНТ, 2 — давление при разрыве без фрагмента, 3 — давление при разрыве с фрагментом, 4 — импульс при взрыве заряда ТНТ, 5 — импульс при разрыве без фрагмента, 6 — импульс при разрыве с фрагментом.

сжатого газа, определяемая по формуле Бейкера [5, 12]:

$$E = \frac{p_1}{\gamma_1 - 1} \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{(1-\gamma_1)/\gamma_1} \right] \cdot \frac{4}{3} \pi r_0^3,$$

где γ_1 — отношение удельных теплоемкостей газа, заполняющего СВД. Безразмерное расстояние $R = r_s/r_{s0}$, где $r_{s0} = (E/p_0)^{1/3}$.

На рис. 2 в безразмерном виде представлены результаты измерений давления и импульса в фазе сжатия УВ для разлета гелия и азота при давлении $p_1 = 0.6$ –2.3 МПа. Кривые на рис. 2 соответствуют параметрам воздушной ударной волны при взрыве зарядов тринитротолуола (ТНТ). Энергия взрыва задана соотношением $E = GW$, где G — вес заряда, W — удельная теплота сгорания ТНТ [5]. Кривые построены по удобным аппроксимационным соотношениям для взрыва заряда ТНТ, приведенным в работе [13]:

$$P_{S1} = \frac{0.46}{R^{4/3}} + \frac{0.099}{R^2} + \frac{0.065}{R^3}, \quad I_{S1} = \frac{0.055}{R^{0.97}}.$$

Анализ представленных на рис. 2 данных показывает, что:

1) избыточное давление на фронте УВ при разрыве мембраны без образования фрагмента выше, чем с фрагментом, в 1.3–2 раза для гелия и в 1.2–1.6 раза для азота.

2) в случае гелия при разрыве без фрагмента экспериментальные данные по P_{S1} близки к кривой для ТНТ. Иная картина возникает при разлете азота. Измеряемые величины P_{S1} оказываются в 2–2.5 раза ниже данных для ТНТ.

3) измеренные величины импульса фазы сжатия УВ во всех случаях соответствуют данным для ТНТ независимо от вида разрыва и сорта газа, заполняющего КВД.

Отметим, что различие в амплитуде УВ при разлете гелия и азота обусловлено трехкратной разницей в скорости звука в них. Для гелия она превышает 1000 м/с и тротиловый эквивалент взрыва СВД близок к единице, по крайней мере в исследованном диапазоне расстояний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена и апробирована методика исследования фугасного и осколочного действия при разрыве емкости под давлением с ис-

пользованием конической ударной трубы. Показано, что с помощью предварительной термической обработки можно варьировать динамику разрыва мембраны, моделирующей оболочку СВД. Установлена взаимосвязь интенсивности формирующихся ударных волн с типом разрыва мембраны. Показано, что при разрыве без образования осколков ударно-волновое действие более интенсивно, тогда как в противном случае часть энергии сжатого газа расходуется на ускорение фрагментов. Проведено сравнение результатов измерений с данными, полученными для ТНТ. Выявленные особенности полезны при оценке возможности моделирования фугасного действия при разрыве СВД по величине тротилового эквивалента.

Научно-исследовательская работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФИЦ ХФ РАН на выполнение госзадания (регистрационный номер 122040500073-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Glass I.I., Hall J.G. // J. Appl. Phys. 1957. V. 28. № 4. P. 424.
2. Glass I.I., Heuckroth L.E. // Phys. Fluids. 1959. V. 2. № 5. P. 542.
3. Boyer D.W. // Ibid. 1960. V. 9. № 3. P. 401.
4. Esparza E.D., Baker W.E. Measurement of blast waves from bursting pressurized frangible spheres. Report NASA CR-2843. San Antonio, TX: Southwest Research Inst., 1977.
5. Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. и др. Взрывные явления. Оценка и последствия. Пер. с англ. / Под ред. Зельдовича Я.Б., Гельфанда Б.Е. М.: Мир, 1986. Кн. 1. С. 319.
6. Cain M.R., Hall R.J. // ASME PVP. 1994. V. 277. P. 29.
7. Taylor D.E., Price C.F. // J. Manuf. Sci. Engineer. 1971. V. 93. № 4. P. 981; <https://doi.org/10.1115/1.3428093>
8. Baum M.R. // J. Pressure Vessel Technol. 1984. V. 106. № 4. P. 362; <https://doi.org/10.1115/1.3264365>
9. Гельфанд Б.Е., Медведев С.П., Поленов А.Н., Хомик С.В. // Изв. РАН. МЖГ. 1997. № 5. С. 132.
10. Медведев С.П., Иванцов А.Н., Михайлин А.И. и др. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 8. С. 3.
11. Medvedev S.P., Anderzhanov E.K., Ivantsov A.N. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2021. V. 2036. P. 012004; <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2036/1/012004>
12. Strehlow R.A., Ricker R.E. // Loss Prevention Sympos. AIChE. 1976. V. 10. P. 115.
13. Silnikov M.V., Chernyshov M.V., Mikhaylin A.I. // Acta Astronautica. 2015. V. 109. P. 235.