

УДК 533.6.07

ИМИТАЦИЯ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА В УДАРНОЙ ТРУБЕ С ФОКУСИРУЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

© 2023 г. С. П. Медведев^{1*}, С. В. Хомик¹, О. Г. Максимова¹, Э. К. Андержанов¹, А. Н. Иванцов¹,
В. Н. Михалкин^{1, 2}, А. М. Тереза¹

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

²Академия государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия

*E-mail: podwal_ac@yahoo.com

Поступила в редакцию 23.03.2023;

после доработки 14.04.2023;

принята в печать 20.04.2023

Выполнен анализ результатов экспериментов, полученных в цилиндрической ударной трубе, оборудованной в торце фокусирующим элементом в виде усеченного конуса. Установлено, что в вершине конуса максимальное давление многократно превышает давление при отражении ударной волны от плоской стенки. Получено хорошее согласие между измеренными профилями давления и результатами численного моделирования фокусировки ударной волны, проведенного с помощью пакета GasDynamicsTool в трехмерной постановке. Показано, что зависимость давления от времени при фокусировке подобна наблюдаемой при нормальном отражении ударной волны, генерируемой взрывом заряда тринитротолуола. Полученные результаты и разработанная методика позволяют проводить имитацию фугасного действия взрыва без использования конденсированных взрывчатых веществ.

Ключевые слова: имитация, действие взрыва, ударная волна, ударная труба, фокусировка, численное моделирование.

DOI: 10.31857/S0207401X23080083, **EDN:** IGUOVO

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование ситуаций, связанных с воздействием случайных или преднамеренных взрывов конденсированных взрывчатых веществ (КВВ), необходимо для разработки систем взрывозащиты различных объектов. В большинстве случаев взрывная нагрузка создается при отражении ударных волн. Наиболее реалистичные условия взрывного нагружения могут быть достигнуты путем проведения полномасштабных полевых испытаний. Однако такой способ имитации реального инцидента часто необоснован из-за регламентных ограничений на использование КВВ, трудоемких мероприятий по обеспечению безопасности, зависимости от погодных условий, высокой стоимости экспериментов, а также их плохой воспроизводимости. Широко распространенной альтернативой являются ударные трубы (УТ), в которых вместо КВВ применяются сжатые газы. Исследуемый объект, как правило, располагается вблизи открытого торца УТ. Треугольный профиль давления, подобный взрывной волне, формируется за счет расширения ударно-сжатого газа из трубы в открытое пространство, а также при использо-

вании укороченной камеры высокого давления [1]. Особую разновидность представляют конические ударные трубы (КУТ) [2–5], хорошо воспроизводящие сферические взрывные волны.

Ударные трубы различных типов приспособлены не только к моделированию взрывов зарядов КВВ, но и к практически важным случаям детонации или быстрого горения топливовоздушных облаков [6, 7]. Однако, несмотря на универсальность, УТ и КУТ имеют общий недостаток, связанный с определенными ограничениями по амплитуде генерируемых ударных волн. В случае, когда труба не сообщается с окружающим пространством, возможно варьирование числа Маха (интенсивности ударной волны) в широком диапазоне за счет снижения давления (откачки) камеры низкого давления [8]. Как правило, при имитировании реальных условий взрыва КВВ эксперименты должны проводиться при начальном давлении 0.1 МПа. Таким образом, повышение интенсивности ударной волны в УТ или КУТ может быть достигнуто только за счет увеличения давления и скорости звука в толкающем газе. Например, для достижения амплитуды отраженной

ударной волны в 10 МПа требуется наполнить камеру высокого давления УТ постоянного сечения гелием до 13.5 МПа или азотом до 81.7 МПа. В отдельных случаях вместо инертного толкающего газа используют высокотемпературные продукты детонации [9], однако это дает небольшой выигрыш в интенсивности ударной волны. Необходимость обеспечить высокое давление толкающего газа и его значительный объем увеличивают сложность и стоимость экспериментов.

При стандартном подходе взрывная нагрузка моделируется с помощью КВВ или УТ путем генерации падающей ударной волны достаточной интенсивности. В этом случае амплитуда отраженной ударной волны жестко связана с интенсивностью падающей волны известными соотношениями. Для преодоления этого ограничения полезно разработать альтернативный подход, при котором параметры отраженной волны могут варьироваться не только за счет интенсивности падающей волны. Такую возможность предоставляет использование явления фокусировки ударной волны [10–12]. Фокусирующий элемент (ФЭ), имеющий вогнутую поверхность (например, полусфера, парабола, конус), помещается в торце камеры низкого давления УТ. Падающая ударная волна испытывает многократные отражения в сходящемся течении внутри ФЭ. При этом пиковая амплитуда давления может значительно превышать величину давления нормального отражения. В работе проведен анализ результатов измерений и численных расчетов параметров волн давления в цилиндрической ударной трубе, оборудованной в торце фокусирующим элементом в виде усеченного конуса. Цель работы – выявление соответствия между взрывными нагрузками, создаваемыми при фокусировке ударной волны и при взрыве заряда КВВ.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования закономерностей фокусировки ударных волн использовалась ударная труба с укороченной камерой высокого давления. Эксперименты проведены в вертикально расположенной УТ диаметром 54 мм с камерой низкого давления длиной 1.05 м и камерой высокого давления длиной 0.07 м. Для разделения камер применялись мембраны из алюминиевой или медной фольги, рассчитанные на давление разрыва в диапазоне 0.3–2.5 МПа. В качестве толкающего газа использовался гелий. Камера низкого давления заполнена воздухом при нормальных условиях. После разрыва мембраны волна разрежения, отраженная от торца камеры высокого давления, догоняет фронт ударной волны до момента отражения от торца камеры низкого давления. Таким образом, выбранные параметры установки обеспечивали формирование ударных волн взрывного

профиля давления (с плавно уменьшающимся давлением за фронтом волны) с числом Маха в диапазоне $M = 1.3–2$.

Фокусирующий элемент, показанный в левой части рис. 1, представлял собой усеченный конус с углом в 66° , расположенный в торце камеры низкого давления ударной трубы. В малом основании конуса монтировался пьезоэлектрический датчик давления Kistler 603В. Рабочая поверхность датчика диаметром $d = 5.6$ мм служила одновременно площадкой, подвергаемой взрывной нагрузке при фокусировке ударной волны. Максимальная величина и профиль давления зависят от интенсивности падающей ударной волны, скорость которой определяли с помощью трех датчиков, расположенных на боковой поверхности камеры низкого давления УТ.

Взаимодействие ударной волны с боковой стенкой сужающегося канала ФЭ приводит, в зависимости от угла наклона, к возникновению регулярного или маховского отражения. Столкновения ударных волн на оси полости отражателя (явление фокусировки) приводят к многократному росту локального давления по сравнению с процессом отражения на плоской поверхности. В цилиндрической трубе в отличие от экспериментов, проводимых в трубе прямоугольного сечения [11], визуализация ударно-волновых конфигураций внутри фокусирующего отражателя невозможна. Для полноценного анализа сложной картины возникающего течения выполнено численное газодинамическое моделирование с помощью пакета GasDynamicsTool (GDT) [13], который показал свою эффективность при расчетах сложных газодинамических течений [2, 3, 14]. Для исследования явления фокусировки ударной волны в трехмерной постановке в силу условий симметрии, как и в [2, 3], поперечное сечение расчетной области было ограничено сегментом, составляющим $1/4$ сечения трубы. Размер расчетной ячейки составлял 0.2 мм.

Рассчитанное пространственное распределение газодинамических параметров на плоскости, проходящей вдоль оси симметрии, представлено в правой части рис. 1. Из расчетных кадров видно, что при $M = 1.52$ на стенке конуса наблюдается маховское отражение. Пересечение и столкновение поперечных ударных волн приводит к резкому росту давления на донную часть ФЭ. При этом нагрузка оказывается неравномерно распределенной по площадке основания, соответствующей чувствительной поверхности датчика давления. В этих условиях для правильной интерпретации экспериментальных записей давления необходимо учитывать, что отклик датчика давления представляет усредненный сигнал, который формируется в результате локальных воздействий. Установлено, что хорошее согласие с результатами

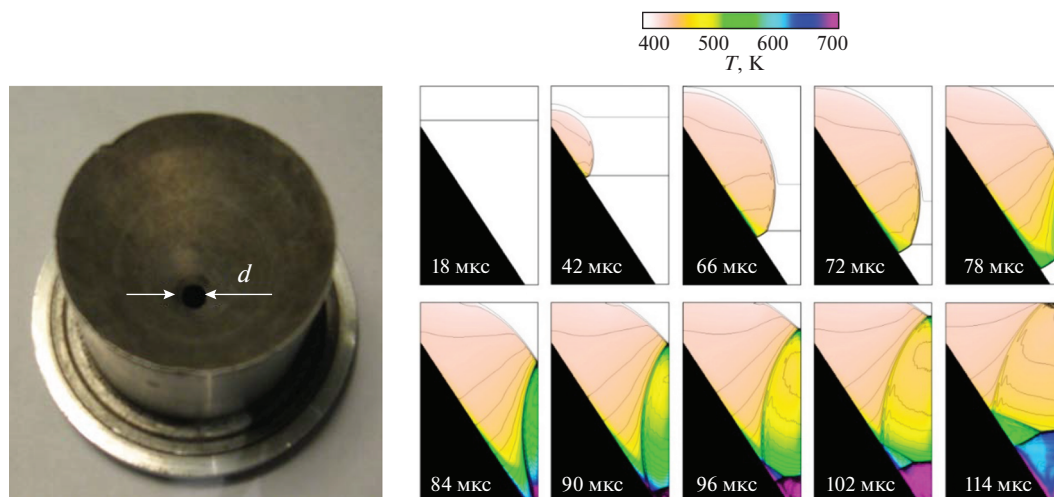


Рис. 1. Внешний вид фокусирующего элемента и картина течения. Изолинии давления — через 0.05 МПа.

экспериментов имеет место в случае, когда рассчитывается усредненное воздействие на “эквивалентную” площадку, моделирующую чувствительный элемент датчика давления. В расчетах это воздействие определялось путем помещения виртуального датчика силы на тело с поперечным размером $d = 5.6$ мм. Отношение рассчитанного сигнала этого датчика к площади поверхности рабочей площадки дает зависимость усредненного профиля давления от времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлена иллюстрация разработанного подхода для сравнения экспериментальных и рассчитанных записей профиля давления. Для рассматриваемого случая: $M = 1.52$, при фокусировке ударной волны экспериментально измеренное избыточное пиковое давление составило около $P_f = 4.7$ МПа, что в 9 раз превышает величину нормального отражения. Как видно из рис. 2, измеренный профиль давления хорошо согласуется с усредненным, полученным в результате численного моделирования. Характерной особенностью является импульсный характер нагружения с относительно быстрым спадом давления. Подобное поведение нагрузки может наблюдаться при нормальном отражении ударной волны при взрыве заряда КВВ. Представляет интерес определить массу m_{eq} и расстояние R_{eq} до соответствующего “эквивалентного” заряда. Для общности будем рассматривать взрыв заряда тринитротолуола (ТНТ).

Подборка наиболее представительных и общепризнанных данных по параметрам взрыва ТНТ содержится в работе [15]. Для решения задачи подбора массы заряда и расстояния удобно воспользоваться расчетным комплексом

CONWER [16], который представляет компиляцию данных [15]. На рис. 2 кружками представлен профиль давления отраженной ударной волны, рассчитанный по CONWER при массе заряда $m_{eq} = 8$ г на расстоянии $R_{eq} = 0.2$ м от заряда. Как видно из рис. 2, расчет по CONWER хорошо аппроксимирует экспериментальный профиль давления по крайней мере до момента снижения амплитуды волны в 8–10 раз по сравнению с пико-

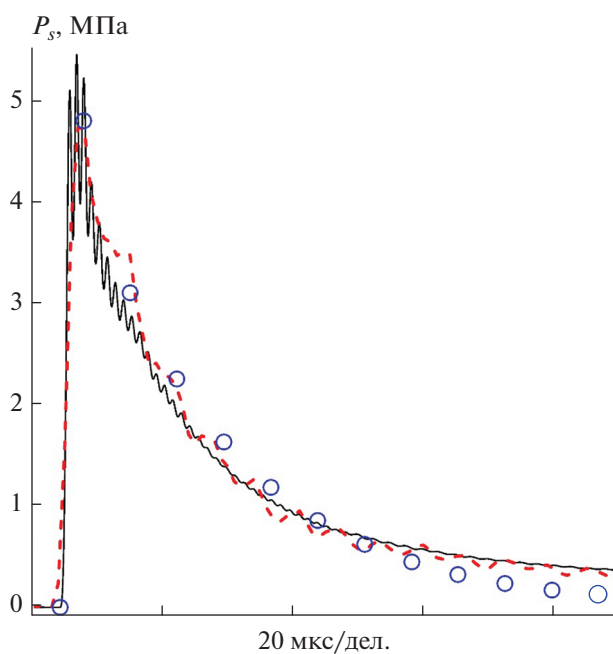


Рис. 2. Экспериментальные и рассчитанные профили давления, действующего на дно усеченного конуса: штриховая кривая — эксперимент по фокусировке при $M = 1.52$, сплошная кривая — численное моделирование, $\circ$ — расчет по CONWER при $m_{eq} = 8$ г и $R_{eq} = 0.2$ м.

Таблица 1. Результаты экспериментов и расчетов

M	P_s , МПа	P_f , МПа	m_{eq} , г	R_{eq} , м	Примечание
1.16	0.04	0.94	1.47	0.2	расчет
1.4	0.112	3.2	5.2	0.2	эксперимент + расчет
1.52	0.153	4.7	8	0.2	эксперимент + расчет
1.77	0.249	10.3	17	0.2	эксперимент + расчет
3	0.933	51.2	130	0.2	расчет
5	2.8	162	140	0.1	расчет

вым значением. Различия между фокусировкой ударной волны и взрывом заряда КВВ проявляются на более поздней стадии. Давление в сферической ударной волне при взрыве КВВ достигает начального, и в дальнейшем может сформироваться фаза разрежения. В ударной трубе после фокусировки амплитуда волны стремится к давлению при нормальном отражении, которое для случая, рассмотренного на рис. 2, составляет около 0.57 МПа. Этот факт следует учитывать при моделировании импульса фазы сжатия отраженной ударной волны, поскольку при фокусировке в УТ он оказывается выше, чем при взрыве заряда КВВ (тринитротуола).

Сравнение результатов численного моделирования с экспериментально измеренными профилями давления при $M = 1.4$ и 1.77 также показало их хорошее совпадение. С учетом проведенной таким образом валидации пакет газодинамических расчетов GDT может рассматриваться как эффективный инструмент расчета процесса фокусировки в УТ. В табл. 1 представлены результаты экспериментов и численного моделирования в относительно широком диапазоне интенсивности падающей на ФЭ ударной волны. Пиковое давление при фокусировке P_f превышает величину избыточного давления P_s в падающей волне в 20–70 раз, причем разница увеличивается с ростом числа Маха последней.

При определении параметров “эквивалентных” зарядов выявлены важные особенности. Как видно из табл. 1, с ростом интенсивности ударной волны величина m_{eq} растет, в то время как расстояние до заряда остается практически постоянным: $R_{eq} = 0.2$ м, за исключением ближней зоны взрыва. Это связано с тем, что длительность выброса давления слабо зависит от числа Маха падающей волны и определяется геометрическими характеристиками ФЭ, а именно его “глубиной”, которая, в свою очередь (при фиксированной форме рефлектора), связана с диаметром ударной трубы. Для проверки этого предположения был проведен расчет при $M = 3$, в котором масштаб ударной трубы, оборудованной ФЭ в виде усеченного конуса, был увеличен за счет задания в 5 раз большего размера расчетной ячей-

ки. В результате максимальное давление P_f оказалось идентичным рассчитанному в трубе меньшего масштаба, а длительность (характерное время спада давления) возросла приблизительно в 5 раз, т.е. пропорционально увеличению линейных размеров. Оба параметра “эквивалентного” заряда ТНТ увеличились и составили $m_{eq} = 16$ кг и $R_{eq} = 1$ м.

Выполненный анализ результатов экспериментов и численного моделирования демонстрирует возможность имитирования фугасной нагрузки при взрыве КВВ с помощью фокусировки ударной волны в ударной трубе. Для сравнения с параметрами взрыва зарядов ТНТ полученные результаты представлены на рис. 3 в виде зависимости от приведенной координаты $R/m^{1/3}$. В соответствии с разработанной методикой экспериментальные и расчетные данные по максимальному давлению при фокусировке сопоставлены с зависимостью амплитуды отраженной взрывной волны от приведенного расстояния [15]. Из рис. 3 видно, что для создания одинаковой нагрузки амплитуда падающей ударной волны при взрыве заряда ТНТ должна в 6–7 раз превышать величину P_s в ударной трубе с фокусирующим элементом. Следует, однако, отметить, что такой существенный выигрыш достигается за счет значительного уменьшения по сравнению с диаметром УТ размера рабочей площадки, на которую воздействует нагрузка. Для приложений, требующих больших размеров этой площадки, необходимо увеличение размеров трубы и ФЭ. Кроме того, форма рефлектора играет важную роль в формировании нагрузки при фокусировке. В общем случае пиковое давление при фокусировке растет с увеличением отношения продольной длины (глубины) ФЭ к диаметру трубы. Таким образом, задача имитации взрывной нагрузки с помощью явления фокусировки ударной волны — многопараметрическая. На данном этапе исследований не ставится задача разработки универсальных соотношений для выбора той или иной конфигурации (масштаба) ударной трубы и ФЭ, отвечающей заранее поставленным условиям. Для исследованного диапазона интенсивности ударных волн в используемых конфигурациях ударной трубы и ФЭ удобно аппроксимировать зависимость пара-

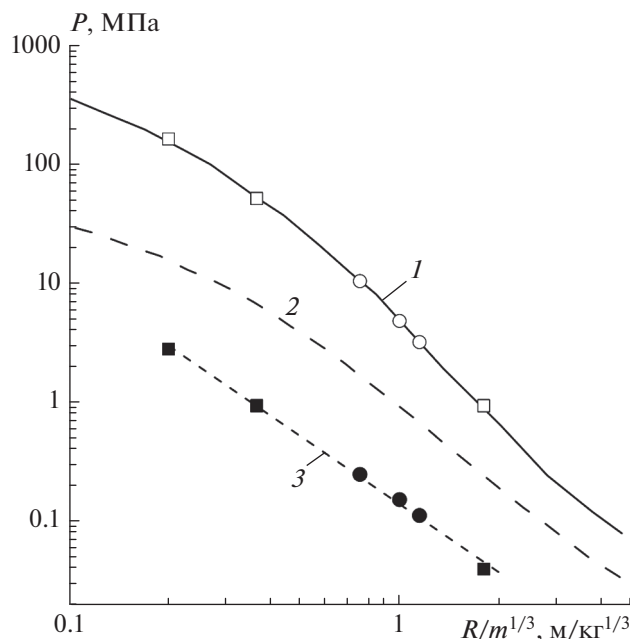


Рис. 3. Зависимости избыточного давления в падающих и отраженных взрывных волнах от приведенного расстояния: 1 — отраженная взрывная волна [15], 2 — падающая взрывная волна [15], $\circ$ и $\bullet$ — экспериментальные величины P_f и P_s , $\square$ и $\blacksquare$ — рассчитанные величины P_f и P_s , 3 — аппроксимационная степенная зависимость.

метра P_s от приведенного расстояния следующим аналитическим соотношением:

$$P_s = 0.14(R/m^{1/3})^{-1.9}.$$

Аппроксимационная зависимость представлена кривой 3 на рис. 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальное и численное моделирование течения, возникающего в ударной трубе, оборудованной в торце фокусирующим элементом в виде усеченного конуса, выявило особенности явления фокусировки ударной волны. Установлено, что на малое основание конуса воздействует кратковременный скачок давления с максимальной амплитудой, многократно превышающей давление при отражении ударной волны от плоской стенки. Показано, что хорошее согласие эксперимента с результатами трехмерного численного моделирования достигается с учетом усреднения взрывной нагрузки по поверхности чувствительного элемента датчика давления. Отмечено подобие зависимостей давления от времени при фокусировке и при нормальном отражении ударной волны, генерируемой взрывом “эквивалентного” заряда КВВ. Показано, что для создания одинаковой нагрузки амплитуда падающей

ударной волны при взрыве заряда ТНТ должна в 6–7 раз превышать соответствующую величину в ударной трубе с фокусирующим элементом. Полученные результаты и разработанная методика позволяют осуществить имитацию фугасного действия взрыва без использования конденсированных взрывчатых веществ.

Научно-исследовательская работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФИЦ ХФ РАН на выполнение госзадания (тема № 122040500073-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Фролов С.М., Поленов А.Н., Цыганов С.А. // Физика горения и взрыва. 1986. № 4. С. 33.
2. Медведев С.П., Иванцов А.Н., Михайлин А.И., Сильников М.В., Тереза А.М., Хомик С.В. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 8. С. 3.
3. Хомик С.В., Гук И.В., Иванцов А.Н. и др. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 8. С. 63.
4. Хомик С.В., Иванцов А.Н., Медведев С.П. и др. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 8. С. 88.
5. Медведев С.П., Иванцов А.Н., Андержанов Э.К., Тереза А.М., Хомик С.В., Черепанова Т.Т. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 12. С. 56.
6. Михалкин В.Н., Сумской С.И., Тереза А.М., Трошин К.Я., Хасаинов Б.А., Фролов С.М. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 8. С. 3.
7. Сумской С.И., Софьин А.С., Зайнетдинов С.Х., Лисанов М.В., Агапов А.А. // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 3. С. 63.
8. Герасимов Г.Я., Козлов П.В., Забелинский И.Е., Быкова Н.Г., Левашов В.Ю. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 8. С. 17.
9. Забелинский И.Е., Козлов П.В., Акимов Ю.В. и др. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 11. С. 22.
10. Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Заманский В.М. и др. // Хим. физика. 1988. Т. 7. № 10. С. 1387.
11. Gelfand B.E., Khomik S.V., Bartenev A.M. et al. // Shock Waves. 2000. V. 10. № 3. P. 197; <https://doi.org/10.1007/s001930050007>
12. Smirnov N.N., Penyazkov O.G., Sevrouk K.L. et al. // Acta Astronaut. 2017. V. 135. P. 114; <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.09.014>
13. Zibarov A.V. // ASME PVP. 1999. V. 397. № 1. P. 117.
14. Медведев С.П., Максимова О.Г., Черепанова Т.Т., Агафонов Г.Л., Андержанов Э.К., Тереза А.М., Хомик С.В. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 11. С. 73.
15. Kingery C.N., Bulmash G. Air blast parameters from TNT spherical air burst and hemispherical surface burst. U.S. Army Ballistic Research Laboratory: MD, Aberdeen Proving Ground. Tech. rep. ARBL-TR-02555, 1984.
16. Hyde D. Microcomputer Programs CONWEP and FUNPRO, Applications of TM 5-855-1, 'Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons'. Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers: MS, Vicksburg. Report AD-A195 867, 1988.