

УДК 358.2; 662.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ САМОДЕЛЬНЫХ ВЗРЫВНЫХ УСТРОЙСТВ И ФОРМ РАЗРУШЕНИЯ ОБОЛОЧЕК КОНТЕЙНЕРОВ ПРИ ВЗРЫВЕ

В. Фань^{*,**}, Н. Чжоу^{***}, Ц. Цзяо^{*}, Ц. Ши^{****}, К. Тан^{*****}

* Пекинский технологический институт, 100081 Пекин, Китай

** Институт криминалистики Министерства общественной безопасности КНР, 100038 Пекин, Китай

*** Нанкинский лесотехнический полицейский колледж, 210023 Нанкин, Китай

**** Ланпек технолоджи компани, 730030 Ланьчжоу, Китай

***** Нанкинский университет наук и технологий, 210094 Нанкин, Китай

E-mails: 103640335@qq.com, nudge@163.com, jqj@bit.edu.cn, 13919259522@163.com, tkui2014@sina.com

С использованием метода конечных элементов и стохастической модели разрушения Мотта изучены свойства цилиндрических самодельных взрывных устройств и формы разрушения оболочек контейнера, в которые заключены заряды. Приведены результаты экспериментальных исследований оболочки контейнера при воздействии гидравлического удара и взрывной волны. Установлено, что характер разрушения контейнера зависит от свойств взрывчатого вещества, количества заряда и его расположения. Разрушение контейнера происходит вследствие накопления сдвиговых деформаций. Показано, что при взрыве самодельных взрывных устройств скорость увеличения давления в контейнере существенно меньше, чем в случае стандартных взрывчатых веществ. В областях оболочки, расположенных вблизи точки детонации, при взрыве образуются более мелкие фрагменты (осколки).

Ключевые слова: самодельное взрывное устройство, фрагмент оболочки, характеристики взрывчатого вещества, моды разрушения, реконструкция взрыва.

DOI: 10.15372/PMTF20200616

Введение. После ряда взрывов были обнаружены фрагменты самодельных взрывных устройств (СВУ) [1, 2]. Вследствие простоты устройства, доступности компонентов, изменяемых при их изготовлении, возможности скрытого изготовления СВУ используются для организации взрывов, представляющих большую угрозу для общества. Это обуславливает необходимость исследования характеристик СВУ и видов повреждения конструкций при их взрыве.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда фундаментальных научных исследований центральных университетов Китая (грант № LGZD202005), Национального фонда естественных наук Китая (грант № 11602113), Фонда естественных наук провинции Цзянсу (грант № ВК20161055) и Фонда научных и технологических инновационных исследований провинции Цзянсу Китая (грант № 2019-29).

© Фань В., Чжоу Н., Цзяо Ц., Ши Ц., Тан К., 2020

Экспериментально и теоретически исследовались способы реконструкции взрыва СВУ, распределение фрагментов конструкций, образующихся при взрыве, по их размеру [3] и массе [4, 5], а также механизмы разрушения различных металлических конструкций [6]. В работе [7] при изучении свойств СВУ использовался пакет программ AUTODYN. Программы AUTODYN 2D и 3D использовались в работе [8] при моделировании воздействия взрывной нагрузки на трубу с открытыми концами. Полученные результаты численного моделирования хорошо согласуются с данными баллистических экспериментов. В работе [9] численно (с помощью пакета программ AUTODYN 3D и стохастической модели Мотта) и экспериментально исследовались фрагменты металлического цилиндра, образующиеся при взрыве СВУ.

В данной работе экспериментально и численно (с использованием пакета программ AUTODYN 3D и стохастической модели разрушения Мотта) изучаются механизмы разрушения цилиндрических контейнеров при гидравлическом ударе и взрыве СВУ, а также характеристики фрагментов контейнера, образующихся при взрыве.

1. Эксперименты. Ниже описаны методика экспериментов и оборудование, используемое при их проведении.

1.1. *Эксперименты на разрушение под действием гидравлического давления.* Эксперименты на разрушение под действием гидравлического давления, как правило, проводятся для определения давления, при котором происходит разрушение сосудов высокого давления. Часто в качестве сосуда высокого давления для хранения взрывчатого вещества (ВВ) используется огнетушитель. В рассматриваемом случае в качестве цилиндрического контейнера для СВУ был выбран огнетушитель, вмещающий заряд массой 2 кг.

Система, создающая избыточное давление, была спроектирована таким образом, чтобы давление непрерывно возрастало. Начальное давление составляло 25,5 МПа, температура окружающей среды равна 20 °С.

1.2. *Испытание огнетушителя при взрыве.* Проведено исследование поведения и видов разрушения огнетушителя при взрыве при различных скоростях увеличения давления.

В эксперименте контейнер полностью загружался самодельным ВВ, масса которого составляла приблизительно 3,8 кг, что приблизительно равно 0,1 кг в тротиловом эквиваленте [10]. Самодельное ВВ было изготовлено из перманганата калия, активных металлов и добавок, свойства которых аналогичны свойствам компонентов пиротехнических устройств. Проведена серия экспериментов по определению чувствительности СВУ к внешним воздействиям (трению, удару). Полученные характеристики и аналогичные характеристики для дымного пороха приведены в табл. 1 (S_f , S_i — чувствительность ВВ к трению и удару соответственно, T_f — температура горения, $(S_f)_{\max}$, $(S_f)_{\min}$ — верхний и нижний пределы чувствительности датчика пламени).

Для анализа характеристик самодельного ВВ был выбран ближайший по свойствам пиротехнический выхлопной агент, содержащий в основном нитраты и активные металлы. Характеристики этого ВВ и СВУ приведены в табл. 2 (V_{outg} — объем дегазации, v_f — линейная скорость горения). Из табл. 2 следует, что самодельные ВВ обладают устойчивостью к вакууму, скорость их горения больше скорости горения веществ, используемых в продукции военного назначения, при этом температура пламени приблизительно одинакова. Таким образом, функциональные свойства СВУ эквивалентны соответствующим свойствам ВВ, используемых в продукции военного назначения, или лучше их. Поэтому можно предположить, что в закрытом сосуде происходят экзотермические газогенерирующие реакции, которые могут привести к взрыву.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Давление на стенки контейнера измерялось датчиком, установленным в верхней части контейнера, избыточное давление — двумя датчиками, расположенными на расстоянии 1,4 м от СВУ. Процесс

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований чувствительности взрывчатых веществ

ВВ	$S_f, \%$	$S_i, \%$	$T_{fl}, ^\circ\text{C}$	$(S_{fl})_{\max}, \text{мм}$	$(S_{fl})_{\min}, \text{мм}$
Самодельное ВВ	51,7	44	320	—	60
Дымный порох	33,3	80	300	200	—

Таблица 2

Характеристики ВВ

ВВ	$V_{outg}, \text{мл/г}$	$v_{fl}, \text{мм/с}$	$T_{fl}, ^\circ\text{C}$
Самодельное ВВ	0,18	6,34	1750
Пиротехнический выхлопной агент	0 ÷ 0,2	2,59 ÷ 3,66	1835–2218

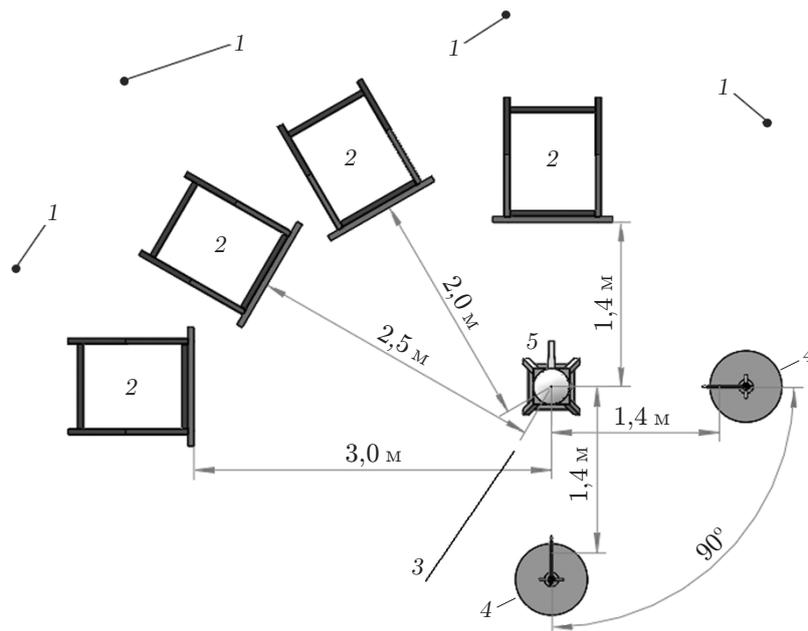


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (вид сверху):

1 — мерный стержень, 2 — стеклянная мишень, 3 — высокоскоростная камера, 4 — датчик давления, 5 — СВУ

разрушения контейнера фиксировался двумя высокоскоростными камерами, для наблюдения за поведением ударной волны на различном расстоянии (1,4 ÷ 3,0 м) от контейнера были установлены четыре стеклянные мишени.

2. Численное моделирование. Для обработки экспериментальных данных и исследования механизма разрушения СВУ использовался пакет программ AUTODYN. Для описания поведения ВВ и воздуха использовался алгоритм Эйлера, для описания поведения оболочки контейнера — алгоритм Лагранжа.

Поскольку определяющие соотношения для СВУ отсутствуют, в численных расчетах рассматривался заряд тринитротолуола (ТНТ). Для моделирования тротилового заряда использовалось уравнение состояния Джонсона — Уилкинса — Ли, для моделирования движения воздуха — NULL-модель материала и уравнение состояния Грюнайзена. Параметры модели Джонсона — Уилкинса — Ли для тротила и параметры воздуха приведены в работах [11, 12], параметры, входящие в определяющие соотношения Джонсона — Кука

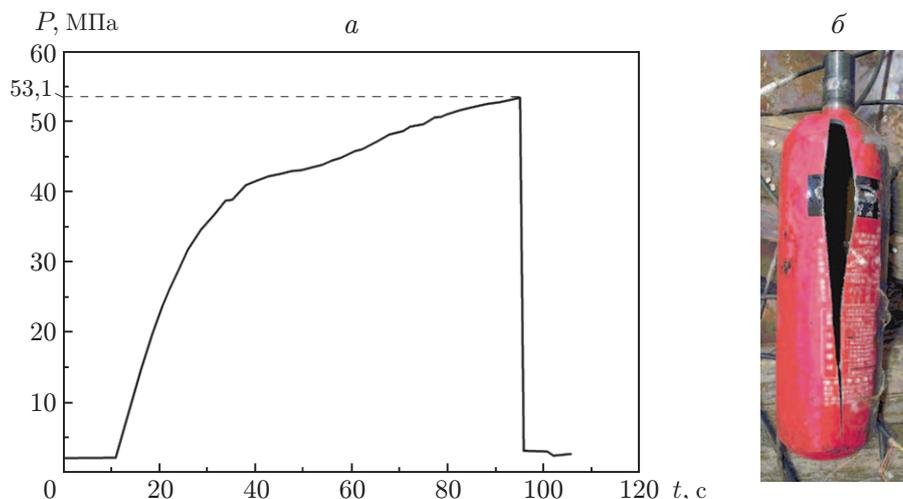


Рис. 2. Зависимость давления от времени (а) и форма повреждения контейнера (б) при гидравлическом ударе

и использованные при моделировании поведения контейнера, — в работе [13]. Для определения случайного распределения фрагментов контейнера применялась стохастическая модель Мотта [14].

Численное моделирование разрушения контейнера диаметром 130 мм и высотой 400 мм, изготовленного из листа стали марки 4340 толщиной 1 мм, выполнено методом конечных элементов с использованием модуля 3D SOLID164. Минимальный размер конечного элемента равен 1 мм. Точка начального детонирования располагалась в верхней части заряда ВВ (ТНТ).

3. Результаты исследования и их обсуждение. Ниже анализируются результаты проведенных экспериментов.

3.1. *Анализ разрушения конструкции.* На рис. 2,а приведена зависимость давления от времени, полученная в экспериментах на гидравлический разрыв. В интервале $t = 0 \div 50$ с давление быстро увеличивается, поскольку в этом интервале происходит наполнение пустого контейнера водой. По мере заполнения контейнера водой скорость увеличения давления уменьшается, при этом оболочка контейнера непрерывно деформируется. При достижении предельного значения давления контейнер разрушается. Давление, при котором происходит разрыв, равно 53,1 МПа. Форма повреждения контейнера показана на рис. 2,б. Разрыв в осевом направлении локализован в середине оболочки контейнера. Форма края разрыва свидетельствует о разрушении в результате сдвига. Поскольку после разрыва не образовались осколки, разрушение было пластическим.

По мере заполнения контейнера водой на внутренней поверхности его стенки появляются растягивающие напряжения и напряжения сдвига. В тот момент, когда напряжения превышают предел прочности материала, начинается разрушение материала, при этом напряжения сдвига больше растягивающих напряжений. Поэтому разрушение контейнера при гидравлическом ударе в основном происходит вследствие больших деформаций сдвига, сопровождающихся деформациями растяжения. Характер разрушения и характер трещины зависят от вязкости и хрупкости материала. Если материал контейнера имеет большую ударную вязкость, то повреждение представляет собой трещину сдвига, расположенную на оси контейнера, и при разрушении не образуются осколки.

Во взрывных экспериментах исследовались закон изменения давления, действующего на стенку контейнера, избыточное давление в воздухе, моды разрушения контейнера. Для

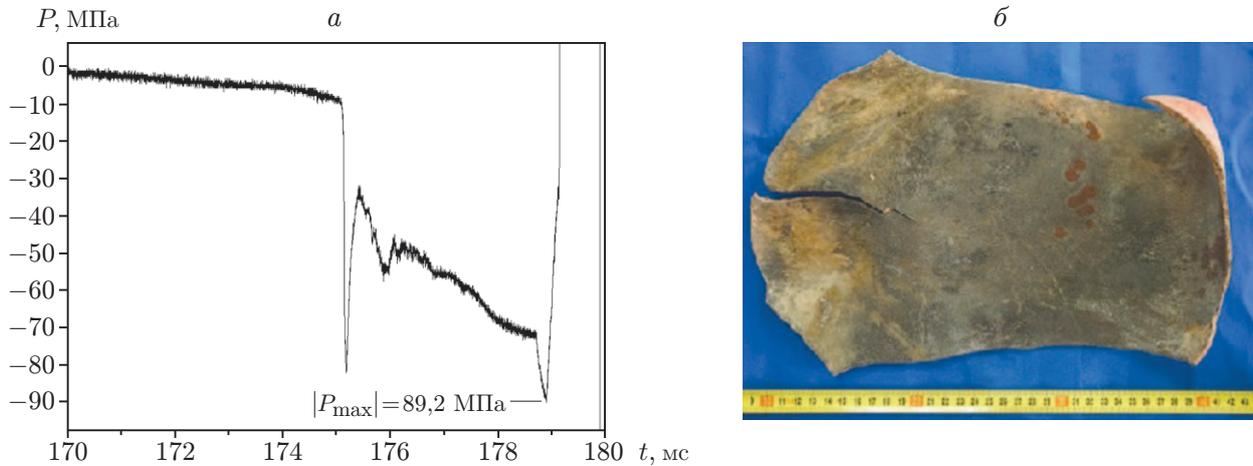


Рис. 3. Зависимость давления от времени (а) и форма повреждения контейнера (б) при взрыве

измерения давления, действующего на стенку контейнера, в верхней части огнетушителя помещался датчик давления с чувствительностью $S_v = 0,07627 \text{ В/МПа}$. После срабатывания взрывного устройства взрывная волна сначала действует на датчик давления.

Экспериментальная зависимость $P \sim t$ приведена на рис. 3,а. Результирующий сигнал отрицательный, что обусловлено характеристиками датчика и усилителя. На кривой $P \sim t$ имеется два пика. Первый пик появляется при $t = 175 \text{ мс}$, максимальное давление равно $|P_{\max}| = 81 \text{ МПа}$, второй — при $t = 179 \text{ мс}$, при этом $|P_{\max}| = 89,2 \text{ МПа}$. В данном эксперименте давление увеличивается в течение меньшего промежутка времени (приблизительно 175 мс), чем в эксперименте на гидравлический удар. Стандартные ВВ (тротил или пиротехнические выхлопные агенты, используемые в продуктах военного назначения) выделяют большое количество газа в течение малого промежутка времени. Поэтому разрушение контейнера происходит на начальной стадии процесса. В диапазоне $175 \text{ мс} \leq t \leq 179 \text{ мс}$ давление достигает максимального значения. В отличие от стандартных ВВ [15] для самодельных ВВ промежутки времени с момента инициирования заряда до момента взрыва в сосуде, находящемся под давлением, достаточно большой, что является особенностью таких ВВ.

Для того чтобы исследовать повреждение объектов, находящихся на различных расстояниях от эпицентра взрыва, измерялось избыточное давление датчиком, чувствительность которого равна $S_v = 13,215 \text{ В/МПа}$. На рис. 4 приведена зависимость избыточного давления от времени. Максимальное давление $P_{\max} = 188,34 \text{ кПа}$, которое достигается в момент времени $t = 181 \text{ мс}$, существенно меньше предельного давления, равного $89,2 \text{ МПа}$ (см. рис. 3,а). Это обусловлено тем, что интенсивность ударной волны, образовавшейся после взрыва СВУ, меньше интенсивности ударной волны, образовавшейся после взрыва стандартного взрывного устройства, и существенно уменьшается по мере ее распространения в воздухе.

Типичная форма разрушения контейнера огнетушителя, полностью заполненного самодельным ВВ, показана на рис. 3,б. После взрыва образовалось несколько крупных фрагментов, размер наибольшего фрагмента составлял приблизительно $31 \times 21 \text{ см}$, масса равна 1871 г (см. рис. 3,б). Размер большинства остальных фрагментов составлял $8 \div 10 \text{ см}$, их общая масса — 2593 г , при этом масса большинства фрагментов, образовавшихся при разрушении дна контейнера, приближенно равна 409 г , масса наименьшего фрагмента — 129 г .

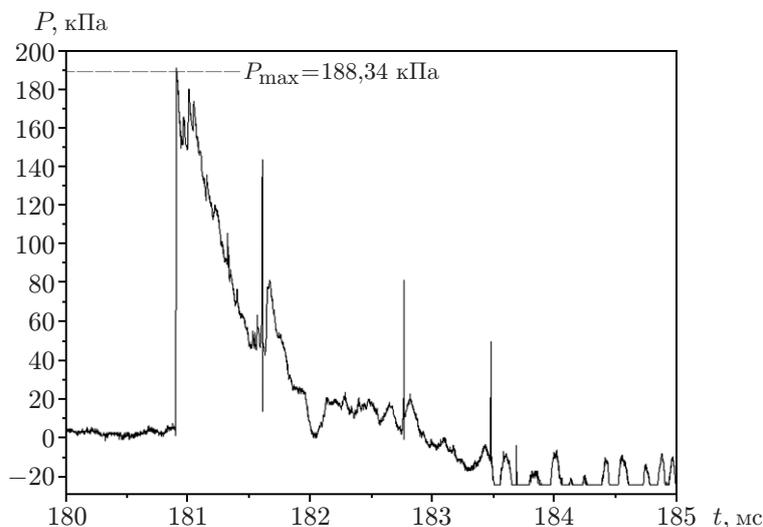


Рис. 4. Зависимость избыточного давления от времени

Таким образом, при взрыве самодельного ВВ образуются фрагменты различных размеров, в том числе несколько фрагментов больших размеров. Следовательно, действие самодельных ВВ отличается от действия стандартных ВВ. Самодельные ВВ используются, главным образом, для того, чтобы создать большое количество газа и вызвать разрушение оболочки контейнера с образованием большого количества фрагментов.

На рис. 5 приведены результаты численного моделирования разрушения контейнера, полученные методом конечных элементов. Если заряд расположен на дне контейнера, то оно начинает разрушаться первым. По мере распространения взрывной волны вверх происходит разрушение крышки по окружности в месте ее крепления. В течение этого промежутка времени вдоль оси контейнера образуются фрагменты различных размеров, которые затем разлетаются в радиальном направлении под действием продуктов взрыва. Структура разрушения контейнера, полученная при численном моделировании, соответствует структуре разрушения, наблюдаемой в эксперименте.

3.2. Исследование распределения давления при различной массе взрывчатого вещества. В экспериментах максимальное значение давления на крышке контейнера в случае, когда он полностью заполнен ВВ, составляло приблизительно 90 МПа. На рис. 6 приведены полученные численно и экспериментально максимальные значения давления на крышке контейнера и моменты времени, в которые они достигаются, в зависимости от количества ВВ (тротила).

Если тротил массой 0,1 кг размещен в центре дна контейнера, то максимальное давление на крышке равно $1,4 \cdot 10^2$ МПа, при этом различие с экспериментальными данными составляет 55,6 %. Чем ближе к крышке расположен заряд и чем больше его масса, тем больше давление на крышку и тем меньше промежуток времени, в течение которого достигается максимальное значение давления (см. рис. 6). Следует отметить, что результаты численного моделирования и экспериментальные данные различаются, поскольку в случае самодельного ВВ скорость увеличения давления в оболочке меньше, чем в случае стандартного ВВ (тротила), используемого при численном моделировании.

Разрушение конструкции при взрыве происходит при воздействии горячих продуктов горения, находящихся под действием высокого давления. На рис. 7 приведены значения давления, при которых происходит разрушение контейнера при различном положении в нем ВВ, а также показаны формы разрушения контейнера.

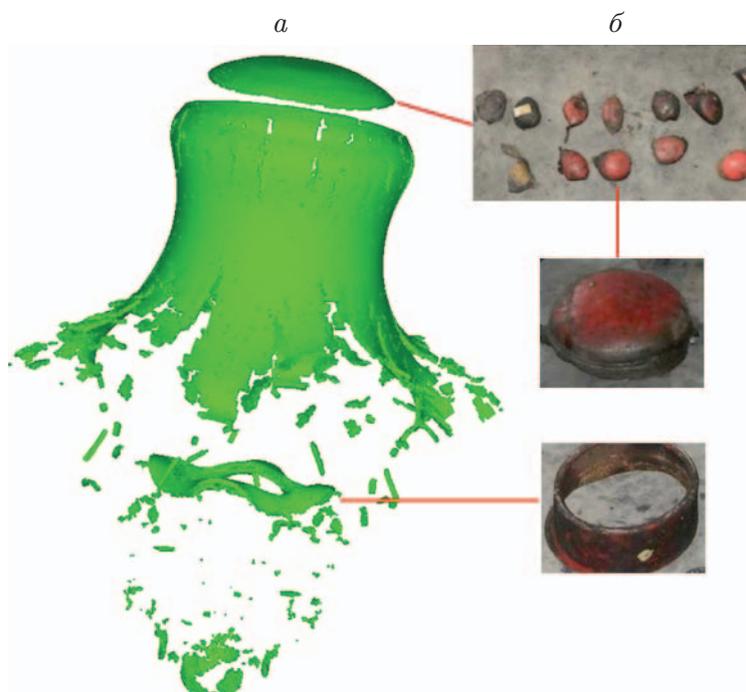


Рис. 5. Разрушение контейнера:
a — результаты численного моделирования, *б* — результаты эксперимента

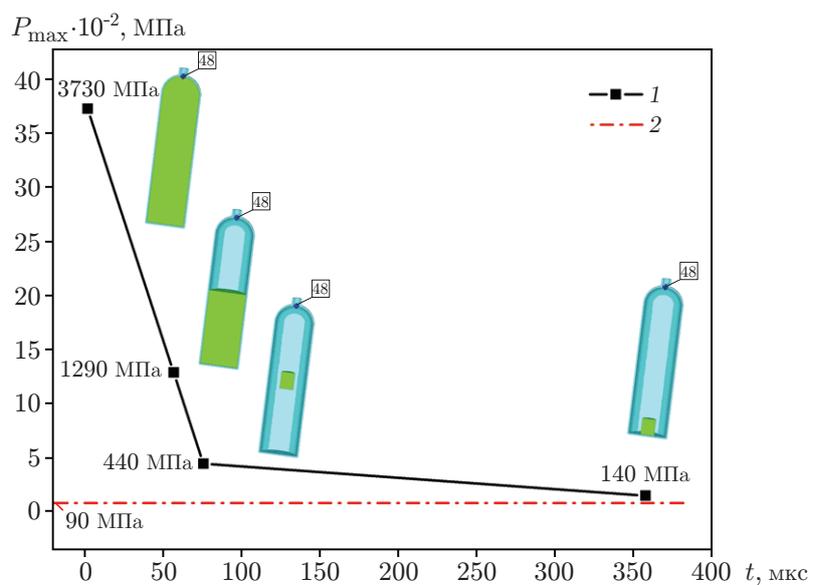


Рис. 6. Зависимость максимального давления на крышке контейнера (точка 48) от количества ВВ:
 1 — результаты численного моделирования, 2 — результаты эксперимента

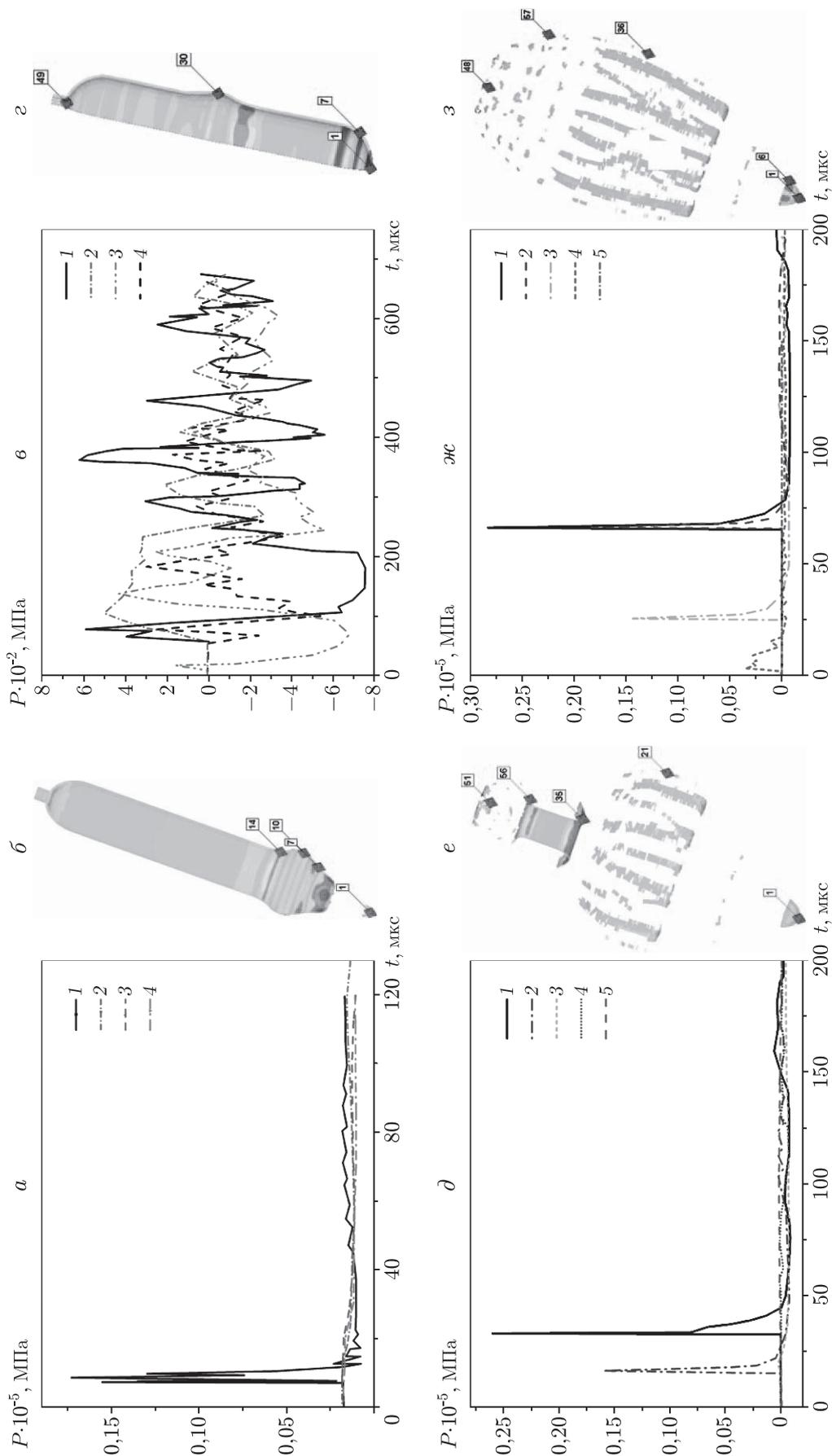


Рис. 7. Зависимость давления от времени при различной массе заряда ВВ m и различном его расположении: $a, б$ — $m = 0,1$ кг (заряд ВВ, расположенный на дне контейнера): 1 — давление в точке 7, 3 — давление в точке 10, 4 — давление в точке 14; $в, г$ — $m = 0,1$ кг (заряд ВВ, расположенный в центральной части контейнера): 1 — давление в точке 1, 2 — давление в точке 7, 3 — давление в точке 30, 4 — давление в точке 49; $д, е$ — $m = 4,3$ кг: 1 — давление в точке 1, 2 — давление в точке 21, 3 — давление в точке 35, 4 — давление в точке 51, 5 — давление в точке 56; $ж, з$ — $m = 8,6$ кг: 1 — давление в точке 1, 2 — давление в точке 6, 3 — давление в точке 36, 4 — давление в точке 48, 5 — давление в точке 57

В случае расположения зарядов ВВ одной и той же массы в различных точках (при выборе точек использовалось распределение Гаусса) зависимости давления от времени различаются. В случае если заряд ВВ расположен на дне контейнера, в моменты времени, близкие к моменту взрыва ($t = 8$ мс), давление, зафиксированное в нижней точке Гаусса, достигает максимального значения $P_{\max} = 1,9 \cdot 10^4$ МПа, затем, при повреждении контейнера, быстро уменьшается до нуля (см. рис. 7,а). В случае если заряд ВВ такой же массы расположен в центре контейнера, давление, зафиксированное в нижней и верхней точках Гаусса, колеблется и постепенно уменьшается до нуля (см. рис. 7,б). В случае ограниченной массы заряда ВВ и распределения ее в большом диапазоне значений давление как в верхней точке контейнера, так и в нижней существенно уменьшается. При этом максимальное давление составляет $7,5 \cdot 10^2$ МПа.

В тех случаях, когда половина заряда ($m = 4,3$ кг) и полный заряд ($m = 8,6$ кг) расположены вдоль оси контейнера, максимальное давление $P_{\max} \approx 2,8 \cdot 10^4$ МПа достигается на дне контейнера в точке, удаленной от точки инициирования заряда. Второй пик давления $P_{\max} \approx 1,5 \cdot 10^4$ МПа появляется в средней точке на оси контейнера. Следует отметить, что в случае полного заряда разрушение начинается в верхней части контейнера, расположенной вблизи точки детонации, после чего давление в этой точке быстро уменьшается до нуля. Таким образом, максимальное значение давления достигается в нижней части контейнера, удаленной от точки детонации.

В случае если заряд расположен на части дна контейнера, в днище сначала появляется выпуклость, а размер области повреждения равен диаметру заряда (см. рис. 7,а,б). При дальнейшем действии продуктов взрыва возникают деформации растяжения в окрестности днища, а затем сдвиговые повреждения в области, размер которой превышает радиус заряда, при этом образуются осколки, летящие на дно контейнера.

Если заряд ВВ такой же массы расположен в центральной части контейнера (см. рис. 7,в,г), то сначала деформируется его центральная часть, а затем деформации распространяются в обоих направлениях. Плоское дно контейнера повреждается более существенно, чем его куполообразная верхняя часть.

В случае половины заряда ($m = 4,3$ кг) и полного заряда ($m = 8,6$ кг) (см. рис. 7,д-з) происходят значительные повреждения части контейнера, непосредственно контактирующей с зарядом ВВ. С момента детонации деформации и разрушение происходят в направлении распространения ударной волны. В случае половины заряда и полного заряда оболочки разрушаются вследствие образования разрыва в осевом направлении, направление разрыва соответствует направлению распространения ударной волны, при этом чем меньше расстояние до точки детонации, тем меньше размер образующегося фрагмента.

Деформации дна, находящегося на большом расстоянии от точки детонации, незначительны, поэтому происходит разрыв в окружном направлении.

В случае половины заряда ВВ в верхней части контейнера происходит разрыв с образованием небольших разлетающихся фрагментов. В случае полного заряда разрушение контейнера в основном происходит с образованием большого количества фрагментов.

Таким образом, разрушение контейнера происходит с образованием разрывов в областях сопряжения элементов оболочки, поскольку именно в этих областях давление значительно больше, а прочность соединений меньше.

Заключение. Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

Код ANSYS/AUTODYN 3D, основанный на методе конечных элементов и стохастической модели Мотта, можно использовать при моделировании разрушения контейнера при воздействии взрывной нагрузки.

В случае цилиндрических самодельных взрывных устройств разрушение оболочки контейнера происходит при больших давлениях в основном вследствие накопления дефор-

маций сдвига в областях соединения элементов оболочки. Тем не менее характер разрушения зависит от массы заряда ВВ и его расположения.

Характер разрушения контейнера существенно зависит от мощности взрыва. При взрыве самодельных устройств образуются осколки различного размера, в том числе крупные.

Полученные результаты могут быть использованы при реконструкции взрыва самодельных взрывных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Nathan J. M., Nancy J. C., Russell B., et al.** Identification of the emplacement of improvised explosive devices by experienced mission payload operators // *Appl. Ergonomics*. 2017. V. 60. P. 43–51.
2. **Gabriele L., Genserik R., Valerio C., et al.** Vulnerability of industrial facilities to attacks with improvised explosive devices aimed at triggering domino scenarios // *Reliab. Engng System Safety*. 2015. V. 143. P. 53–62.
3. **Elek P., Slobodan J.** Fragment size distribution in dynamic fragmentation: geometric probability approach // *FME Trans*. 2008. V. 36. P. 59–65.
4. **Elek P., Slobodan J.** Fragment mass distribution of naturally fragmenting warheads // *FME Trans*. 2009. V. 37. P. 129–135.
5. **Arnold W., Rottenkolber E.** Fragment mass distribution of metal cased explosive charges // *Intern. J. Impact Engng*. 2008. V. 35. P. 1393–1398.
6. **Goto D. M., Becker R., Orzechowski T. J.** Investigation of the fracture and fragmentation of explosively driven rings and cylinders // *Intern. J. Impact Engng*. 2008. V. 35. P. 1547–1556.
7. **Kong X. S., Wu W. G., Li J.** A numerical investigation on explosive fragmentation of metal casing using Smoothed Particle Hydrodynamic method // *Mater Design*. 2013. V. 51. P. 729–741.
8. **Choi M. J., Lee J. R., Kong C. W.** Development of a numerical model for an expanding tube with linear explosive using AUTODYN // *Shock Vibrat*. 2014. V. 10. P. 136–156.
9. **Yi Y. S., Yoo Y., Kim H. J.** Study on the natural fragmentation formed by metal cylinder explosion // *Proc. of the 29th Intern. symp. on ballistics, Edinburgh (UK), 7–11 May 2016*. Lancaster: DEStech Publ., 2016. P. 1565–1569.
10. **Locking P. M.** The trouble with TNT equivalence // *Proc. of the 26th Intern. symp. on ballistics, Miami (USA), 8–12 Sept. 2011*. S. 1., 2011. P. 12–16.
11. **Xia Z. C., Wang X. H., Fan H. L., et al.** Blast resistance of metallic tube-core sandwich panels // *Intern. J. Impact Engng*. 2016. V. 97. P. 10–28.
12. **Dusenberry D.** Handbook for blast resistant design of buildings. Hoboken: John Wiley and Sons, 2010.
13. **Zhou N., Wang J. X., Yang R.** Numerical study on dispersion characteristics and damage results of pre-fragment warhead // *Appl. Mech. Materials*. 2012. V. 152. P. 775–780.
14. **Mott N. F.** Fragmentation of shell cases // *Proc. Roy. Soc. London. Ser. A*. 1947. V. 189. P. 300–308.
15. **Ackland K., Bornstein H., Lamos D.** An analysis of TNT equivalencies using AUTODYN // *Intern. J. Explos. Engng*. 2013. V. 1. P. 80–88.

*Поступила в редакцию 17/І 2020 г.,
после доработки — 12/ІІІ 2020 г.
Принята к публикации 30/ІІІ 2020 г.*