

УДК 550.348

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ УГЛА ПРИ ДЕТОНАЦИИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ ТАТБ И CL-20

С.-Л. Го, В. Цао, И.-Л. Дуань, Ю. Хань, Ц.-Л. Жань, С.-Цз. Лу

Институт химических материалов, Китайская академия инженерной физики, 621900 Мянъян, Сычуань, Китай, weicao668@163.com

На основе грибовидного теста проведены эксперименты по изучению процесса обтекания угла детонационными волнами во взрывчатых веществах на основе ТАТБ и CL-20 (РВХ-I, РВХ-II, РВХ-III). Определены угол первого выхода детонационной волны на поверхность заряда, угол срыва детонации и время задержки ее распространения при диаметре инициирующего заряда 10 и 15 мм. Показано, что в случае РВХ-I эти параметры возрастают при увеличении диаметра инициирования. Углы первого выхода и углы срыва детонации в РВХ-II и РВХ-III равны 90° при диаметре инициирования 10 мм, в то время как в РВХ-I при таком же диаметре инициирования эти углы составляют 22.7 и 31.9° . Это свидетельствует о том, что взрывчатые вещества на основе CL-20 имеют прекрасные характеристики обтекания угла даже при наличии 13.5 % (масс.) алюминиевой пудры в РВХ-III. На основе модели Ли — Тарвера проведено двумерное численное моделирование для РВХ-I. Результаты моделирования хорошо согласуются с данными экспериментов.

Ключевые слова: обтекание угла, грибовидный тест, пластические взрывчатые вещества, ТАТБ, CL-20, численное моделирование.

DOI 10.15372/FGV20160612

ВВЕДЕНИЕ

После входа детонационной волны в заряд большего диаметра из меньшего движение расходящейся детонационной волны не подчиняется принципу Гюйгенса: в некоторых направлениях появляется временная задержка движения волны или образуются в ряде случаев «мертвые зоны» (зоны непрореагировавшего или частично прореагировавшего взрывчатого вещества (ВВ)) — явление, известное как обтекание угла (corner turning) детонационной волной. Анализ этого процесса важен для понимания свойств ВВ, построения логических взрывных цепей и теории расходящихся детонационных волн.

Характеристики обтекания угла для ТАТБ (1,3,5-триамино-2,4,6-тринитробензол) и пластических ВВ на его основе были исследованы ранее. В работе [1] проведено изучение этого процесса в РВХ-9502 (95 % (масс.) ТАТБ и 5 % Kel-F 800) при помощи многоцелевой методики и определен размер

«мертвой зоны». В экспериментах авторы использовали длинный цилиндрический заряд, который переходил в заряд намного большего диаметра. Позднее эта геометрия была усовершенствована и доведена до теста автором работ [2, 3], который ввел термин «мертвая зона» для непрореагировавшего ВВ. В работе [4] рассмотрено распространение детонации в очень малочувствительных ВВ, включая ультрадисперсный ТАТБ, мелкозернистый ТАТБ и РВХ-9504 (70 % (масс.) ТАТБ, 25 % тэна, 5 % связующего), путем разработки грибовидного теста, что позволило получить больше данных при использовании меньшего количества ВВ. Достоинство этого теста состоит в том, что поверхность наблюдения хорошо совпадает с формой выходящей волны. В [5–7] экспериментально изучали формирование «мертвой зоны» при обтекании угла детонационными волнами в LX-17 (92.5 % (масс.) ТАТБ и 7.5 % Kel-F 800). Помимо этого, авторы провели численное моделирование образования «мертвых зон», используя зависимость скорости реакции от давления. В работе [8] грибовидный тест выполнен для ВВ на основе ТАТБ и установлено, что на форму детонационной

© Guo Xiang-Li, Cao Wei, Duan Ying-Liang, Han Yong, Ran Jian-Long, Lu Xiao-Jun, 2016.

Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, 621900 Mianyang, Sichuan, China.

волны, выходящей на поверхность, влияют зернистость ВВ и диаметр полусферического образца. В [9] обтекание угла детонационной волной в LX-17 изучали экспериментально и путем двумерного численного моделирования по модели реагирующего потока. В работе [10] исследовали обтекание угла в РВХ-9404 на основе октогена и в РВХ-9502 на основе ТАТБ с использованием программы LS-DYNA.

В данной работе грибовидный тест использован для изучения характеристик детонационных волн при обтекании угла в пластических ВВ (включая алюминизированное ВВ) на основе ТАТБ и CL-20 (2,4,6,8,10,12-гексанитро-2,4,6,8,10,12-гексаазаизовюрцитан). Установлены и сопоставлены между собой особенности распространения детонации в этих ВВ, связанные с их физическими параметрами. В дополнение к экспериментам проведено численное моделирование обтекания угла при движении детонационной волны в РВХ-I по модели Ли — Тарвера.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальная установка для проведения грибовидного теста показана на рис. 1. Диаметр, состав и плотность основных полусферических прессованных зарядов РВХ-I, РВХ-II и РВХ-III приведены в табл. 1. Заряды

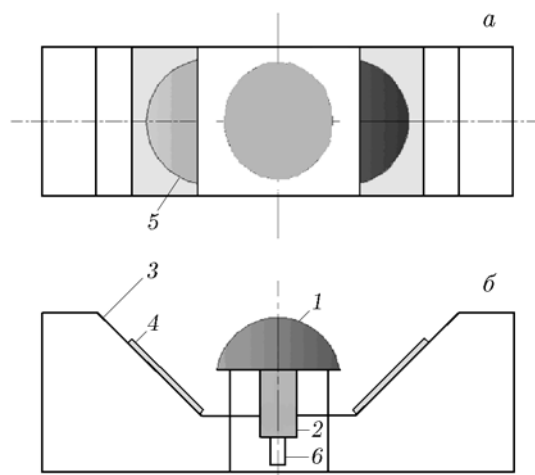


Рис. 1. Экспериментальная сборка для грибовидного теста:

a — вид сверху, *б* — вид сбоку; 1 — основной заряд, 2 — промежуточный заряд (бустер), 3 — основание (подставка), 4 — зеркало, 5 — отраженное изображение, 6 — детонатор

Таблица 1

Параметры основных зарядов

ВВ	Диаметр, мм	Массовый состав	Плотность, г/см ³
РВХ-I	50	ТАТБ/связка: 95/5	1.895
РВХ-II	50	CL-20/связка: 95/5	1.870
РВХ-III	50	CL-20/Al/связка: 81.5/13.5/5	1.930

РВХ-I инициировались детонационной цепью, состоящей из детонатора № 8, промежуточного (бустерного) заряда пластического ВВ на основе октогена (цилиндрический прессованный заряд длиной 10 мм и плотностью 1.86 г/см³) и промежуточного заряда РВХ-I (цилиндрический прессованный заряд длиной 50 мм и плотностью 1.895 г/см³), диаметр обоих бустерных зарядов составлял 10 мм, а в одном случае — 15 мм. Заряды РВХ-II и РВХ-III инициировались детонатором № 8 и промежуточным зарядом пластического ВВ на основе октогена (цилиндрический прессованный заряд диаметром 10 мм, длиной 50 мм и плотностью 1.86 г/см³). Бустерные и основные заряды предоставлены Институтом химических материалов Китайской академии инженерной физики. Для регистрации изображения детонационной волны, выходящей на поверхность основного полусферического заряда, использовался высокоскоростной фоторегистратор (скорость вращения зеркала 7.5 мм/мкс, т. е. 150 000 об/мин). Пара зеркал отдельно была закреплена на наклонных плоскостях под углом 45° по отношению к горизонтальной стальной опоре. Выход детонационной волны на боковые стороны основного заряда отражался зеркалами на фоторегистратор.

При изготовлении основного заряда из РВХ-I на верх его полусферической части наклеивали прозрачную ленту с нанесенным на нее люминесцирующим веществом (BaNO₃ с зернистостью 0.12 ÷ 0.18 мм) для усиления светимости регистрируемой области основного заряда. Регистрация эксперимента одновременно проводилась напрямую (верхняя часть заряда) и при помощи двух зеркал (боковые части).

Принципиальная схема грибовидного теста для визуализации формы волны показана на рис. 2. Поперечное сечение ограничено полусферой основного заряда, осевая линия, проведенная через заряд, определена как нуль гра-

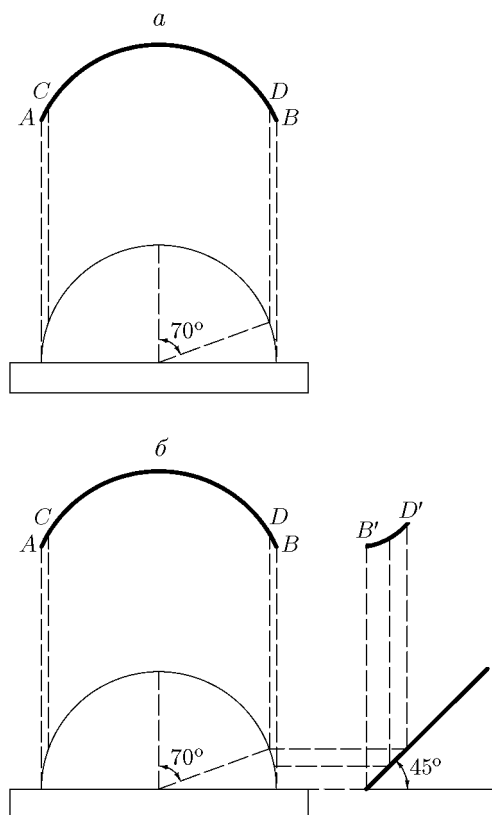


Рис. 2. Принципиальная схема теста:
 а — без зеркала, б — с зеркалом

дусов, а края в любом направлении находятся под углом 90° . В случае, когда выход волны на поверхность заряда регистрируется камерой напрямую (без зеркала), форма волны представлена сегментом AB (рис. 2, а). Однако из-за структуры сборки и слабого свечения боковых краев полусферической шашки только сегмент CD (см. рис. 2, а) может быть записан точно, угол записи составляет $\approx 70^\circ$. При использовании зеркала сегмент BD увеличивается в $2 \div 3$ раза до $B'D'$ (рис. 2, б), при этом форма волны меньше перекрывается и данные записываются точнее. Таким образом, можно получить более широкий диапазон определения времени задержки выхода детонационной волны из полусферического заряда и точнее установить его свойства.

По полученным фоторегистрограммам можно определить три параметра процесса обтекания угла детонационной волной в данном образце ВВ: угол первого выхода волны на поверхность заряда θ_{fb} , угол срыва детонации (угол отказа) θ_{fa} и время задержки выхода

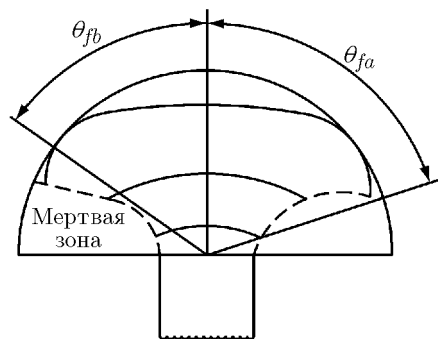


Рис. 3. Определение угла первого выхода детонационной волны и угла срыва детонации

волны t_{ind} . Способ определения углов θ_{fb} и θ_{fa} показан на рис. 3. Угол θ_{fb} находят непосредственно по фоторегистрограммам как угол между осевой линией и линией от центра инициирующего заряда к точке на поверхности основного заряда, в которой появляется первое свечение. Чем лучше распространяется волна, тем меньше отставание по краям и тем ближе θ_{fb} к идеальному значению 90° .

При повороте на большой угол детонационная волна затухает до состояния ударной волны, движется с меньшей скоростью и за фронтом волны остается область непрореагировавшего или частично прореагировавшего материала. Интенсивность ударной волны в данных экспериментах недостаточна, чтобы вызвать свечение $BaNO_3$, поэтому точка на пленке, в которой не регистрировалось свечение, считалась точкой срыва детонации и по ней вычислялся угол отказа θ_{fa} . Время задержки t_{ind} определялось как разница между моментом выхода детонационной волны в точке срыва детонации и первым выходом на поверхность полусферы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Фоторегистрограммы экспериментов с взрывчатыми составами РВХ-I, РВХ-II и РВХ-III представлены на рис. 4. Изображения боковых поверхностей на рис. 4, а, б невелики, тогда как на рис. 4, в, г они заметно больше. При инициировании основного заряда одного и того же состава зарядами разного диаметра — 10 или 15 мм — фоторегистрограммы, полученные от верхних частей полусфер заряда, существенно отличаются (ср. рис. 4, а и 4, б).

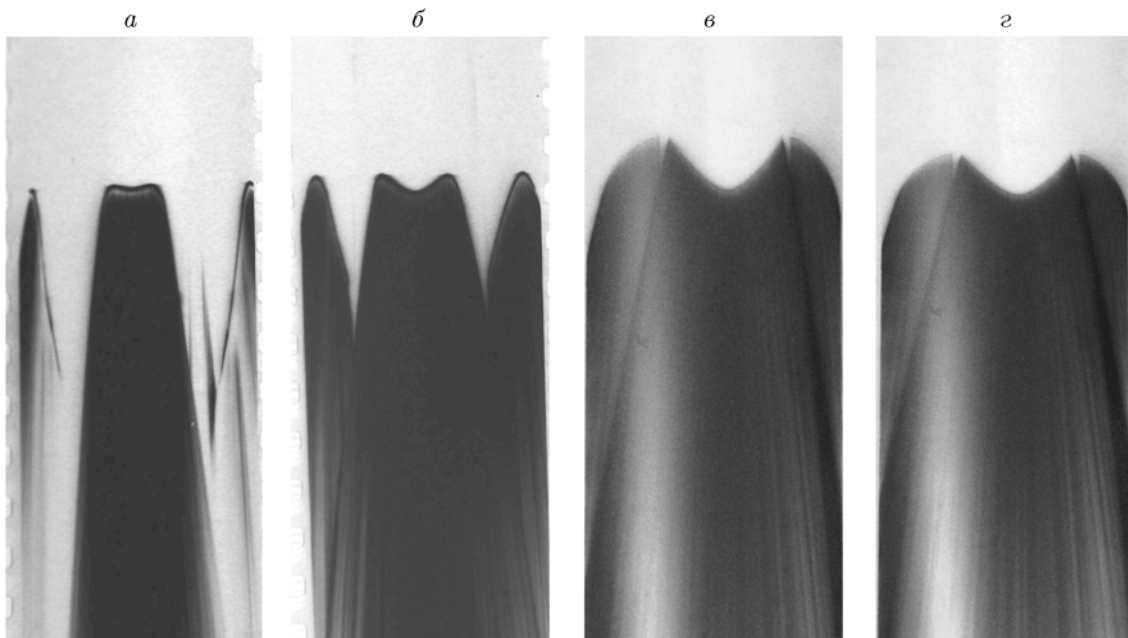


Рис. 4. Фоторазвертки детонации ВВ при различных диаметрах инициирующего заряда:
a — PBX-I, диаметр инициирования 10 мм; *б* — PBX-I, 15 мм; *в* — PBX-II, 10 мм; *г* — PBX-III, 10 мм

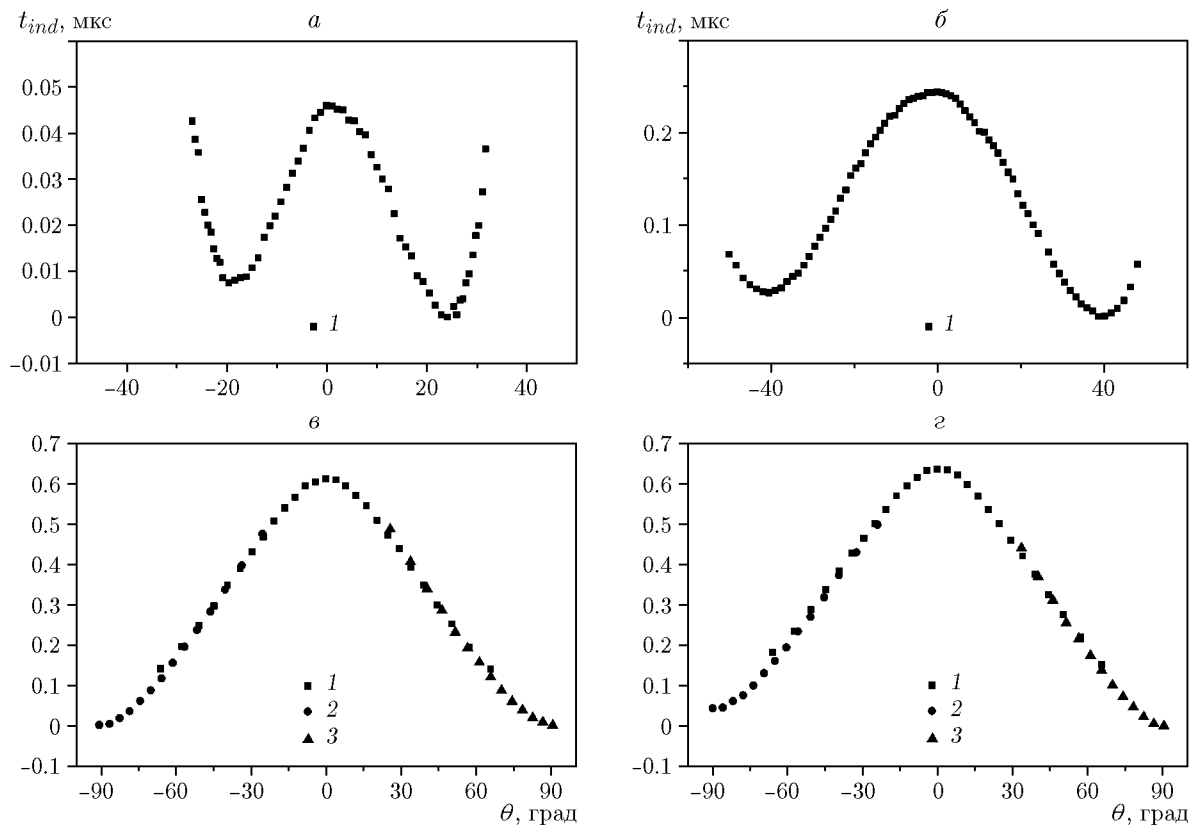


Рис. 5. Комбинированный график зависимости времени задержки детонации от полярного угла:
a — PBX-I, диаметр инициирования 10 мм; *б* — PBX-I, 15 мм; *в* — PBX-II, 10 мм; *г* — PBX-III, 10 мм;
 1 — вид по центру (прямой), 2 — вид от левого зеркала, 3 — вид от правого зеркала

Время задержки t_{ind} при инициировании зарядом диаметром 10 мм явно меньше, чем при диаметре 15 мм.

Фоторегистрограммы рис. 4 были оцифрованы и объединены для получения комбинированного графика зависимости времени задержки детонации t_{ind} от полярного угла θ (рис. 5). При идеальном распространении детонационной волны угол первого выхода должен быть

равен 90° . Рассчитанные значения величин θ_{fb} , θ_{fa} и t_{ind} представлены в табл. 2. Видно, что для РВХ-I значения θ_{fb} и θ_{fa} намного меньше 90° , но все значения θ_{fb} , θ_{fa} и t_{ind} растут с увеличением диаметра инициирования. При одном и том же диаметре инициирования значения θ_{fb} и θ_{fa} для РВХ-I меньше, чем для РВХ-II и РВХ-III, т. е. РВХ-II и РВХ-III имеют очень хорошие характеристики при обтекании угла детонационной волной. Это объясняется тем, что ВВ на основе СЛ-20 является представителем идеальных мощных ВВ. СЛ-20 отличается высокими энергией и чувствительностью, поэтому критическое давление инициирования ВВ на его основе существенно меньше, чем у ВВ на основе ТАТБ, которое характеризуется высокой термостойкостью и низкой чувствительностью, что приводит к высокому порогу его инициирования и длительному времени перехода к стационарной детонации.

Таблица 2

Результаты теста

ВВ	Диаметр инициирования, мм	θ_{fb} , град	θ_{fa} , град	t_{ind} , нс
РВХ-I	10	22.7	31.9	39
РВХ-I	15	40.0	49.9	218
РВХ-II	10	90	90	608
РВХ-III	10	90	90	629

Таблица 3

Параметры модели для пластических ВВ на основе РВХ-I и октогена

1. Параметры моделирования детонации в РВХ-I ($\rho_0 = 1.895$ г/см ³)		
Параметры JWL для непрореагировавшего ВВ	Параметры JWL для продуктов	Константы уравнения для скорости реакции
$A = 77\,810$ ГПа	$A = 531.396$ ГПа	$I = 4.0 \cdot 10^6$ мкс ⁻¹
$B = -5.031$ ГПа	$B = 2.70309$ ГПа	$a = 0.22$
$R_1 = 11.3$	$R_1 = 4.1$	$b = 0.667$
$R_2 = 1.13$	$R_2 = 1.1$	$x = 7.0, F_{ig\,max} = 0.5$
$\omega = 0.8938$	$\omega = 0.46$	$G_1 = 0.006$ ГПа ⁻¹ · мкс ⁻¹
$c_v = 2.487 \cdot 10^{-3}$ ГПа/К	$c_v = 1.0 \cdot 10^{-3}$ ГПа/К	$c = 0.667$
$T_0 = 298$ К	$E_0 = 6.9$ ГПа	$d = 0.111$
Модуль сдвига 4.54 ГПа	—	$y = 1.0, F_{G_1\,max} = 0.5$
Предел прочности 0.2 ГПа	—	$G_2 = 4$ ГПа ⁻¹ · мкс ⁻¹
—	—	$e = 0.333, z = 1.0$
—	—	$g = 1.0, F_{G_2\,min} = 0$
2. Параметры JWL детонации Чепмена — Жуге в РВХ-I		
$\rho_0 = 1.895$ г/см ³ ; $D = 0.757$ см/мкс; $p_{CJ} = 29.5$ ГПа; $A = 531.396$ ГПа; $B = 2.70309$ ГПа; $R_1 = 4.1$; $R_2 = 1.1$; $\omega = 0.5$; $E_0 = 1.266$ ГПа		
3. Параметры JWL детонации Чепмена — Жуге в пластическом ВВ на основе октогена		
$\rho_0 = 1.86$ г/см ³ ; $D = 0.8835$ см/мкс; $p_{CJ} = 36.8$ ГПа; $A = 852.4$ ГПа; $B = 18.02$ ГПа; $R_1 = 4.55$; $R_2 = 1.3$; $\omega = 0.38$; $E_0 = 10.2$ ГПа		

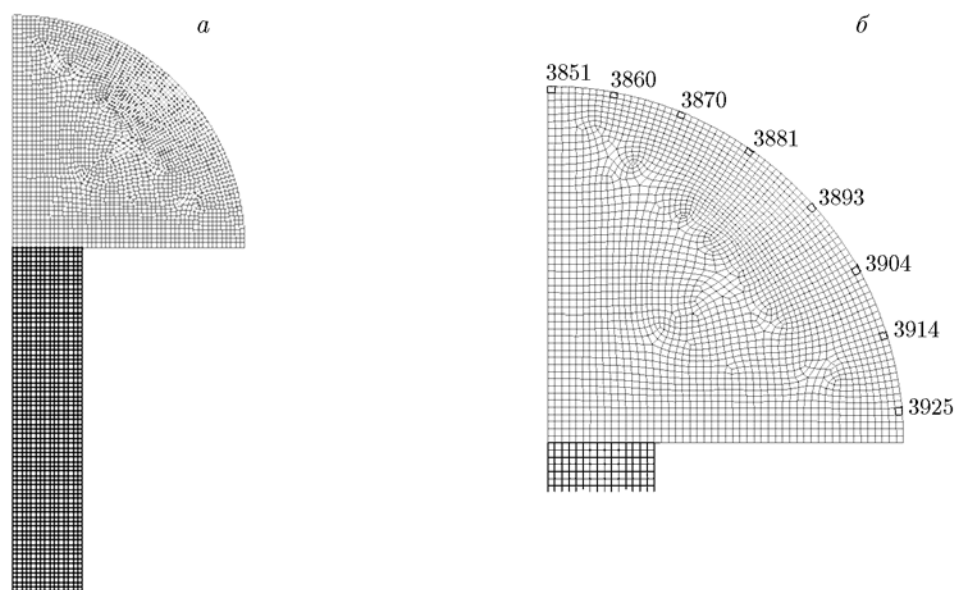


Рис. 6. Численное моделирование геометрической модели:

a — половина модели грибовидного теста; *б* — пронумерованные элементы — точки, в которых регистрируются профили давления (датчики)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для численного моделирования характеристик обтекания угла в заряде PBX-I использовалась модель Ли — Тарвера. Модель включает в себя два уравнения состояния Джонса — Уилкинса — Ли (JWL), одно для непрореагировавшего ВВ, другое для продуктов реакции:

$$p = A \exp(-R_1 V) + B \exp(-R_2 V) + \omega c_v T / V,$$

где p — давление, Мбар, V — относительный объем, T — температура, ω — коэффициент Грюнайзена, c_v — средняя теплоемкость, A , B , R_1 , R_2 — константы. Скорость реакции — переход ВВ в продукты — задается выражением

$$\begin{aligned} \frac{dF}{dt} = & I(1 - F)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + \\ & + G_1(1 - F)^c F^d p^y + G_2(1 - F)^e F^g p^z, \\ & 0 < F < F_{ig \max}, \quad 0 < F < F_{G_1 \max}, \\ & 0 < F < F_{G_2 \max}, \end{aligned}$$

где F — доля реагирующего ВВ, t — время, ρ — текущая плотность, ρ_0 — начальная плотность, I , G_1 , G_2 , a , b , c , d , e , g , x , y , z — константы. Предполагается, что давления и температуры непрореагировавшего ВВ и продуктов находятся в равновесии.

В табл. 3 приведены параметры для скорости реакции, использованные при моделировании детонации PBX-I [10], а также параметры уравнения состояния JWL для детонации Чепмена — Жуге и для продуктов предполагаемой мгновенной детонации пластических бустерных зарядов PBX-I и зарядов на основе октогена [11]. Численное моделирование для основного заряда из PBX-I проведено по программе ANSYS LS-DYNA. Для расчета брали половину модели грибовидного теста при диаметре инициирующего заряда 15 мм (рис. 6, *a*). Элементы № 3851, 3860, 3870, 3881, 3893, 3904, 3914 и 3925, показанные на рис. 6, *б*, выбраны в качестве точек для регистрации давления. Распределение давления в PBX-I в различные моменты после инициирования зарядом диаметром 15 мм показано на рис. 7. Профили давления, регистрируемые в точках, отмеченных на рис. 6, представлены на рис. 8. На основе данных рис. 7, 8 можно приближенно получить значения θ_{fb} и θ_{fa} . Значение θ_{fa} определялось в точке, в которой давление меньше 0.15 ГПа. Рассчитано, что $\theta_{fb} = 36.4^\circ$, $\theta_{fa} = 50.5^\circ$. В случае инициирования детонации того же PBX-I зарядом диаметром 10 мм эти величины равны 25.3° и 35.4° . Сопоставление с данными, приведенными в табл. 2, демонстрирует хорошее соответствие результатов расчетов и экспери-

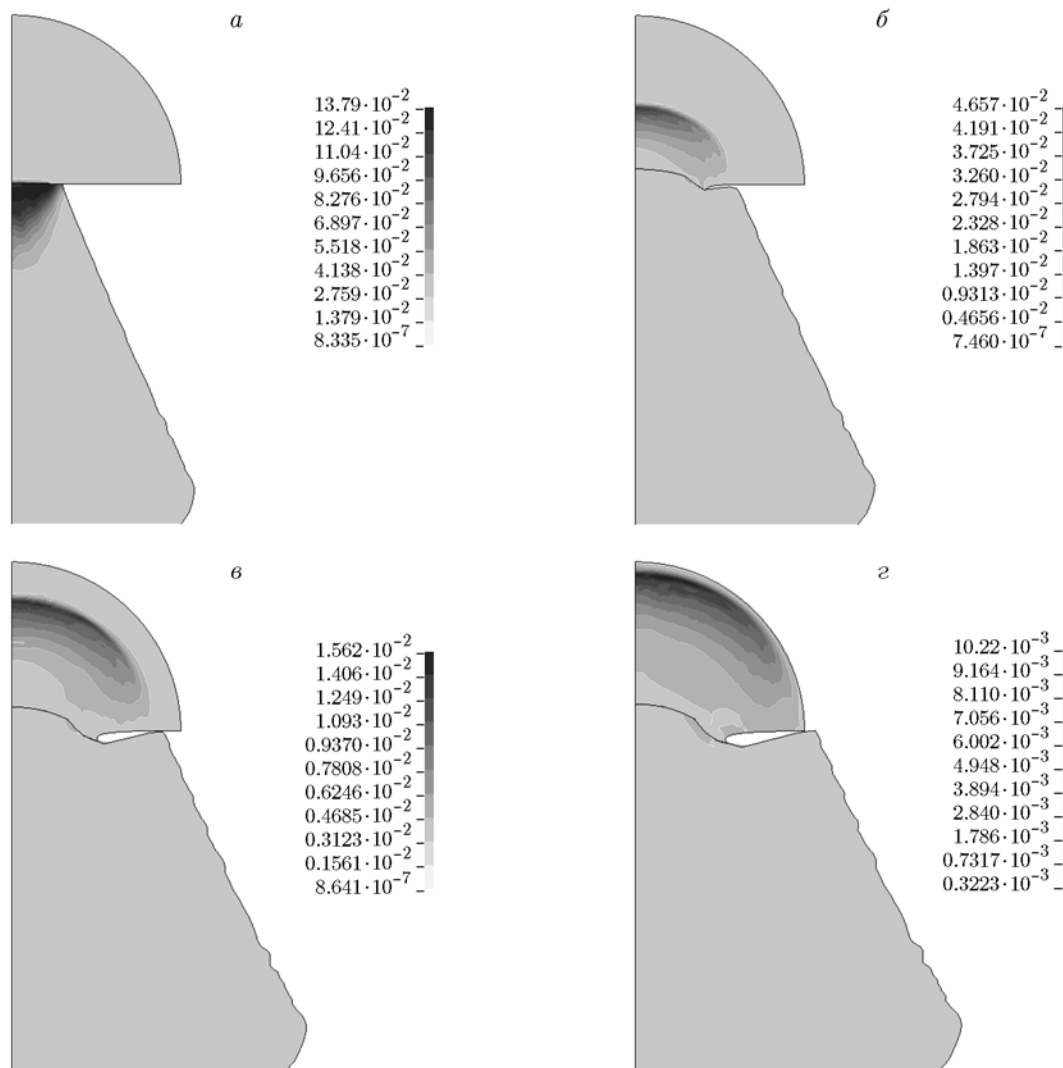


Рис. 7. Распределение давления в РВХ-I в моменты времени $t = 6.70$ (а), 9.10 (б), 11.42 (в), 12.74 мкс (г) после инициирования детонации зарядом диаметром 15 мм

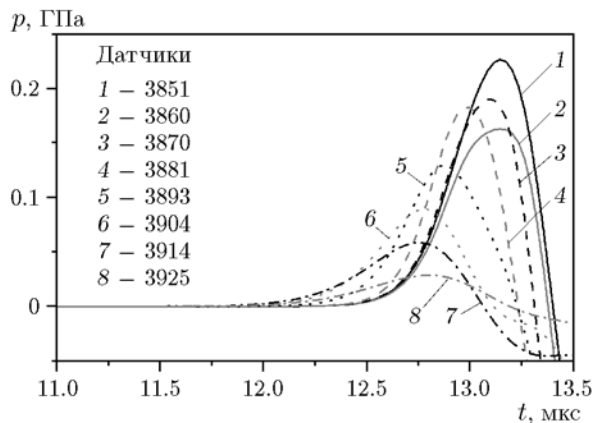


Рис. 8. Профили давления в РВХ-I, регистрируемые выбранными датчиками (см. рис. 6), при диаметре инициирующего заряда 15 мм

ментов, следовательно, использованная модель хорошо описывает грибовидный тест.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе грибовидного теста экспериментально и численно исследованы характеристики обтекания угла детонационной волной в пластических взрывчатых веществах на основе ТАТБ и CL-20.

Углы первого выхода (θ_{fb}), срыва (θ_{fa}) детонации и времени ее задержки для РВХ-I растут при увеличении диаметра инициирования от 10 до 15 мм. Для РВХ-II и РВХ-III значения θ_{fb} и θ_{fa} равны 90° , в то время как для РВХ-I при диаметре инициирования 10 мм $\theta_{fb} = 22.7^\circ$ и $\theta_{fa} = 31.9^\circ$. Это показывает, что взрывча-

тые вещества на основе CL-20 имеют прекрасные характеристики обтекания угла даже при наличии 13.5 % (масс.) алюминиевой пудры в PBX-III.

Двумерный численный анализ PBX-I на основе модели Ли — Тарвера позволил определить распределение давления в заряде при проведении грибовидного теста и рассчитать углы θ_{fb} и θ_{fa} . Результаты расчета хорошо совпадают с экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (N 11372291) и Инновационного фонда Института химических материалов, САЕР (KJCX-201202).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Cox M., Campbell A. W.** Corner-turning in TATB // 7th Symp. (Intern.) on Detonation, Dahlgren, Virginia, USA, 1981. — P. 624–633.
2. **Held M.** Corner-turning distance and detonation radius // Propell., Explos., Pyrotech. — 1989. — V. 14, N 4. — P. 153–161.
3. **Held M.** Corner turning research test // Propell., Explos., Pyrotech. — 1996. — V. 21, N 4. — P. 177–180.
4. **Hill L. G., Seitz W. L., Forest C. A., Harry H. H.** High explosive corner turning performance and LANL mushroom test // Tenth Amer. Phys. Soc. Top. Conf. on Shock Compress. of Condens. Matter., Amherst, Massachusetts, USA, 1997. — P. 751–754.
5. **Souers P. C., Andreski H. G., Cook C. F., III, Garza R., Pastrone R., Phillips D., Roeske F., Vitello P., Molitoris J. D.** LX-17 corner turning // Propell., Explos., Pyrotech. — 2004. — V. 29, N 6. — P. 359–367.
6. **Souers P. C., Andreski H. G., Batteux J., Bratton B., Cabacungan C., Cook C. F., III, Fletcher S., Garza R., Grimsley D., Handly J., Hernandez A., McMaster P., Molitoris J. D., Palmer R., Prindiville J., Rodriguez J., Schneberk D., Wong B., Vitello P.** Dead zones in LX-17 and PBX 9502 // Propell., Explos., Pyrotech. — 2006. — V. 31, N 2. — P. 89–97.
7. **Souers P. C., Hernandez A., Cabacungan C., Garza R., Lauderbach L., Liao S., Vitello P.** Air gaps, size effect, and corner-turning in ambient LX-17 // Propell., Explos., Pyrotech. — 2009. — V. 34, N 1. — P. 32–40.
8. **Huang Y., Lu B., Han Y.** Corner-turning test and numerical simulation of TATB-based PBX explosive // Eighth Natl. Explos. Mech. of Acad. Conf Proc., Ji'an, Jiangxi, China, 2007. — P. 55–57. [in Chinese]
9. **Tarver C. M.** Corner turning and shock desensitization experiments plus numerical modeling of detonation waves in the triaminotrinitrobenzene based explosive LX-17 // J. Phys. Chem. A. — 2010. — V. 114, N 8. — P. 2727–2736.
10. **Han Y., Jiang Z., Huang Y., Long X.** Numerical simulation of corner turning of PBX-9404 and PBX-9502 explosive // Chin. J. Explos. Propell. — 2011. — V. 34, N 6. — P. 30–33. [in Chinese]
11. **Han Y., Lu B., Jiang Z., Lu X.** Shock sensitivity of JO-9159/ECX composite charge // Chin. J. Energ. Mater. — 2008. — V. 16, N 2. — P. 164–166. [in Chinese]

Поступила в редакцию 10/XI 2015 г.