

Проявление эффекта ударно-волновой десенсибилизации при возбуждении детонации в тонких слоях взрывчатого вещества высокоскоростными ударниками

© И.Ф. Кобылкин, А.В. Петюков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Статья посвящена численному моделированию возбуждения детонации в экранированных тонких слоях взрывчатых веществ (ВВ) при воздействии на них высокоскоростных ударников. При моделировании учитывалась ударно-волновая десенсибилизация, которая возникает вследствие предварительного сжатия ВВ ударной волной, образующейся на начальной стадии проникания ударника в экранированный слой ВВ. При решении этой задачи с помощью программы LS-DYNA установлено, что поскольку в кинетике Ли — Тарвера, интегрированной в программу LS-DYNA, не учитывается эффект ударно-волновой десенсибилизации, не представляется возможным воспроизвести экспериментальный факт существования максимальной толщины экрана, при превышении которой детонация в заряде ПВВ-12М толщиной 6 мм не возбуждается при воздействии на него ударника диаметром 17,5 мм со скоростью 2,21 км/с. Для учета эффекта ударно-волновой десенсибилизации в задачах возбуждения детонации был использован решатель «Эрудит» — двухмерный численный решатель задач механики сжимаемой прочной сплошной среды, разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана С.В. Федоровым. В этот решатель интегрирована модернизированная кинетика разложения ВВ Ли — Тарвера, учитывающая возможность десенсибилизации ВВ при немономтонном нагружении. Разработанный метод численного моделирования позволяет воспроизводить экспериментальные данные. Как показали расчеты, при воздействии ударника на экранированный тонкий слой ПВВ-12М толщиной 6 мм при толщине лицевой пластины 7 мм возбуждения детонации не происходит, а при толщине пластины 6 мм происходит, что согласуется с экспериментальными данными.

Ключевые слова: возбуждение детонации, ударная волна, десенсибилизация, численное моделирование, кинетика разложения, тонкий слой ВВ.

Тонкие слои ВВ в качестве объекта исследования представляют большой практический и теоретический интерес, поскольку используются во многих взрывных технологиях и устройствах для метания и нагружения различных тел и пластин [1]. В то же время в недостаточной степени изучены практически важные механизмы и критерии ударно-волнового возбуждения детонации в тонких слоях ВВ при интенсивных локализованных воздействиях различной природы [2, 3]. В настоящей работе приведены результаты численного моделирования возбуждения детонации в экранированных тонких слоях ВВ при воздействии высокоскоростных формируемых взрывом ударников (ФВУ).

Постановка задачи, представленная на рис. 1, соответствует экспериментальным исследованиям, результаты которых даны в работах [2, 3].

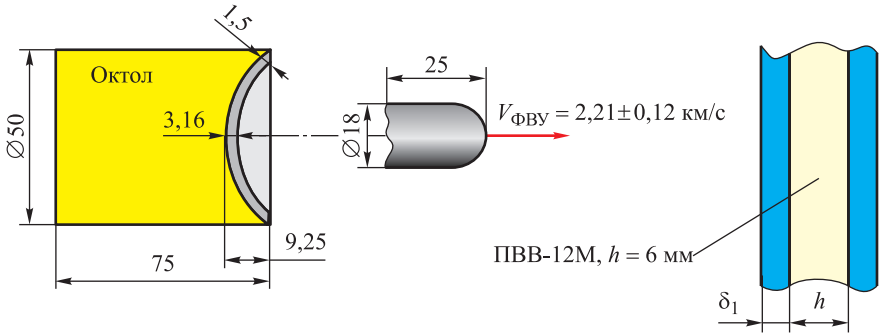


Рис. 1. Расчетная схема

В проведенных экспериментах в качестве снарядоформирующих зарядов (СФЗ) использовали модельные лабораторные заряды из литьевого состава на основе октогена и ТНТ диаметром 50 мм и высотой 75 мм с медной параболической облицовкой диаметром 45 мм, высотой 9,24 мм и переменной толщиной 3,16/1,5 мм. При взрыве таких СФЗ образуются высокоскоростные ударники цилиндрической формы с полусферической головной частью диаметром $(17,5 \pm 0,5)$ мм и длиной (24 ± 1) мм. Скорость $V_{ФВУ}$ составляла $(2,21 \pm 0,12)$ км/с. Формируемые взрывом ударники взаимодействовали с размещенным между двумя стальными пластинами слоем ПВВ-12М.

В результате проведения экспериментов определена предельная толщина лицевой экранирующей пластины δ_{1max} , при превышении которой детонация в заряде ВВ толщиной 6 мм при воздействии ФВУ не инициировалась. Оказалось, что в условиях эксперимента δ_{1max} практически не зависит от угла воздействия α :

$$\delta_{1max}(\alpha = 90^\circ) = \delta_{1max}(\alpha = 30^\circ) = 6,5 \pm 0,5 \text{ мм.}$$

Для объяснения этого факта было выполнено численное моделирование исследуемого процесса.

Первоначально численное моделирование в соответствии с расчетной схемой, представленной на рис. 1, проводили в программе *LS-DYNA* методом *ALE-2D*. В качестве уравнения состояния (УРС) ВВ и продуктов детонации (ПД) использовали УРС в форме *JWL* [4]:

$$p(v, e) = A \left(1 - \frac{\Gamma}{R_1 \frac{v}{v_0}} \right) \exp \left(-R_1 \frac{v}{v_0} \right) + B \left(1 - \frac{\Gamma}{R_2 \frac{v}{v_0}} \right) \exp \left(-R_2 \frac{v}{v_0} \right) + \frac{\Gamma e}{v}, \quad (1)$$

где p, e, v, v_0 — давление, полная энергия, удельный объем и начальный удельный объем в расчетной ячейке соответственно; Γ — коэффициент Грюнайзена; A, B, R_1, R_2 — эмпирические коэффициенты, приведенные в табл. 1 [4].

Таблица 1

Коэффициенты уравнения JWL для ПВВ-12М

Взрывчатое вещество и продукты его детонации	A , ГПа	B , ГПа	R_1	R_2	Γ
ПВВ-12М	77 810	-5,031	11,3	1,13	0,8938
ПД ПВВ-12М	609,77	12,95	4,5	1,4	0,25

Уравнение (1) является уравнением типа Ми — Грюнайзена с опорной кривой «холодного» сжатия в виде

$$p_x(v) = A \exp\left(-R_1 \frac{v}{v_0}\right) + B \exp\left(-R_2 \frac{v}{v_0}\right);$$

$$e_x(v) = v_0 \left[\frac{A}{R_1} \exp\left(-R_1 \frac{v}{v_0}\right) + \frac{B}{R_2} \exp\left(-R_2 \frac{v}{v_0}\right) \right],$$

где $p_x(v)$ — давление сжатия при температуре 0 К; $e_x(v)$ — «холодная» составляющая энергии.

Тепловые составляющие давления и энергии определяются следующим образом:

$$p_T(v, e) = \frac{\Gamma e_T}{v}; \quad e_T = C_V T,$$

где C_V — удельная теплоемкость при постоянном объеме.

Для описания кинетики разложения ВВ использовали модель Ли — Тарвера [3, 4]:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \begin{cases} I(1-\lambda)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x, & \text{если } \frac{\rho}{\rho_0} > a+1 \text{ и } \lambda < \lambda_{igmax}; \\ G_1(1-\lambda)^c \lambda^d p^y, & \text{если } \lambda < \lambda_{G1max}; \\ G_2(1-\lambda)^e \lambda^g p^z, & \text{если } \lambda > \lambda_{G2min}, \end{cases} \quad (2)$$

где λ — массовая доля ВВ; ρ_0, ρ — начальная и текущая плотность в расчетной ячейке; $I, b, a, x, \lambda_{igmax}, G_1, c, d, y, \lambda_{G1max}, G_2, e, g, z, \lambda_{G2min}$ — эмпирические коэффициенты, приведенные в табл. 2. Первоначально эти коэффициенты были выбраны такими же, как для состава С-4 — аналога ПВВ-12М [5]. Затем их корректировали, исходя из лучшего приближения к экспериментальным результатам работы [6].

Таблица 2

Коэффициенты кинетики Ли —Тарвера для ПВВ-12М

$I, \text{мкс}^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{11}$	$G_1, \text{Мбар}^{-y} \cdot \text{мкс}^{-1}$	250	$G_2, \text{Мбар}^{-y} \cdot \text{мкс}^{-1}$	0
b	0,667	c	0,667	e	0,667
a	0,0367	d	0,333	g	0,667
x	7,0	y	2,0	z	3,0
λ_{igmax}	0,022	λ_{G1max}	1,0	λ_{G2max}	0

Для описания сжимаемости стальных пластин использовали УРС Ми — Грюнайзена. Механическое поведение материала пластин описывалось моделью Мизеса [4].

На рис. 2 и 3 приведены результаты расчета в виде распределений поля давления и массовой доли ПД в слое ВВ в различные моменты времени. Толщина пластин составляла 7 мм.

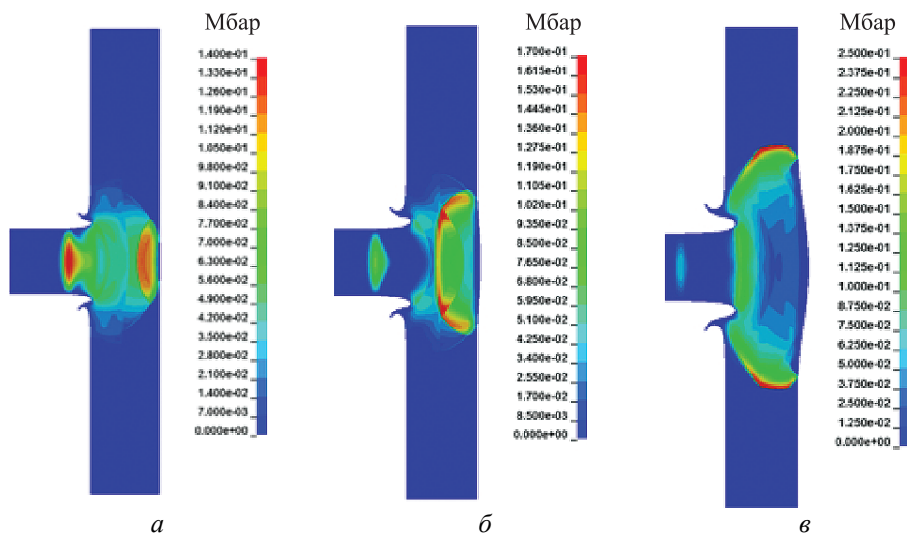


Рис. 2. Распределения поля давления в слое ВВ и пластинах, полученные с помощью программы *LS-DYNA*:
 а — $t = 3,5$ мкс; б — $t = 4,5$ мкс; в — $t = 6$ мкс

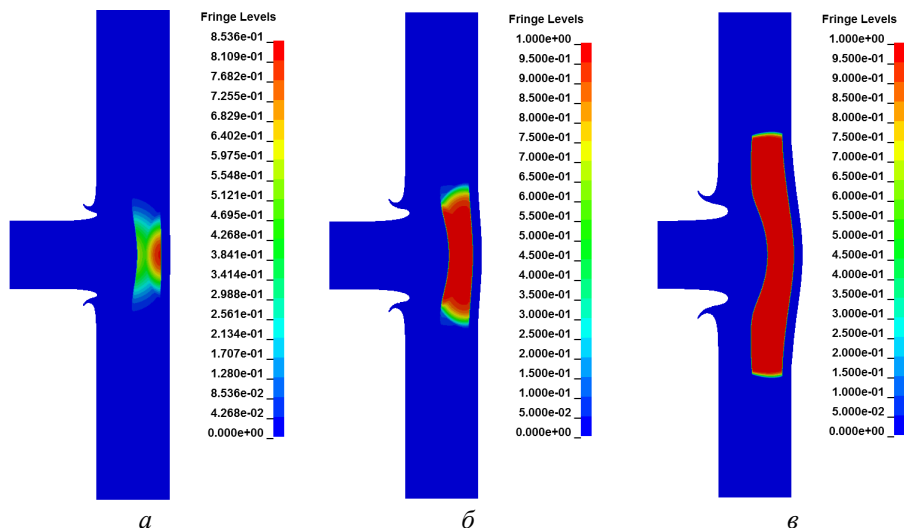


Рис. 3. Распределения массовой доли ПД в слое ВВ и пластинах:
а — $t = 3,5$ мкс; *б* — $t = 4,5$ мкс; *в* — $t = 6$ мкс

Для того чтобы получить представление о характере нагружения ВВ, на плоскости симметрии в заряде ВВ на расстоянии $h/2 = 3$ мм от лицевой пластины на различных расстояниях от оси симметрии ударного взаимодействия установили эйлеровы виртуальные датчики давления. На рис. 4 и 5 показаны зависимости давления от времени, записанные этими датчиками. Из анализа полученных зависимостей следует, что ударная волна 2, отраженная от тыльной пластины, ускоряется, догоняет предшествующую ударную волну 1, образовавшуюся на начальной стадии взаимодействия ФВУ с лицевой пластиной, и переходит в детонационную волну. В аналогичных экспериментах при толщине лицевой пластины 7 мм фиксировался отказ детонации.

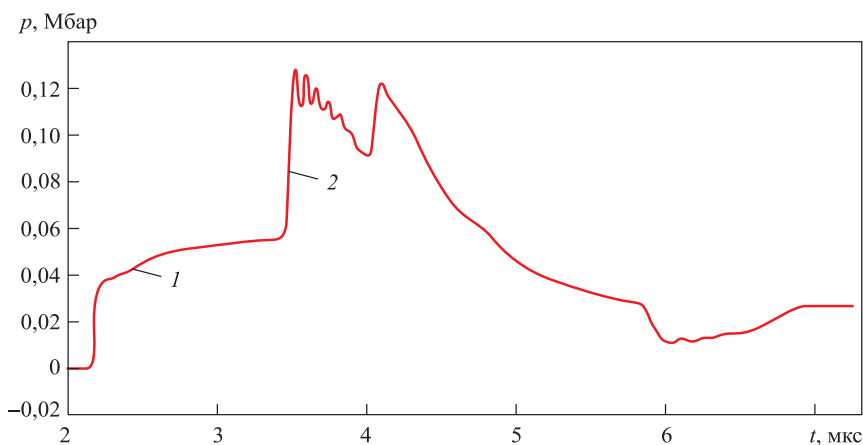


Рис. 4. Зависимость давления от времени, записанная датчиком, находящимся на оси симметрии ударного взаимодействия:
 1 — первая ударная волна, образованная ударом ФВУ по лицевой пластине; 2 — ударная волна, отраженная от тыльной пластины

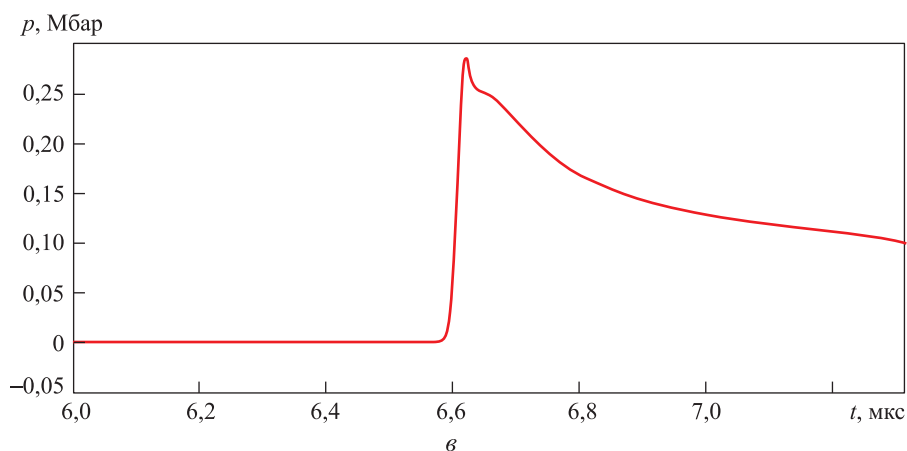
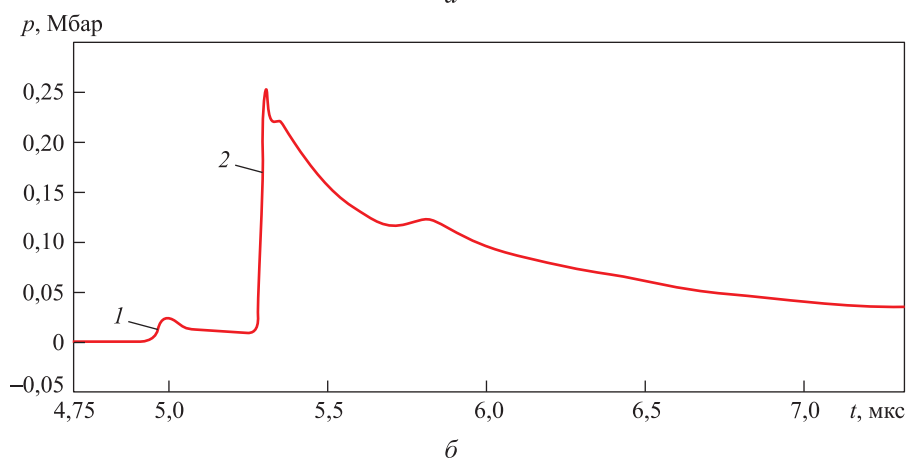
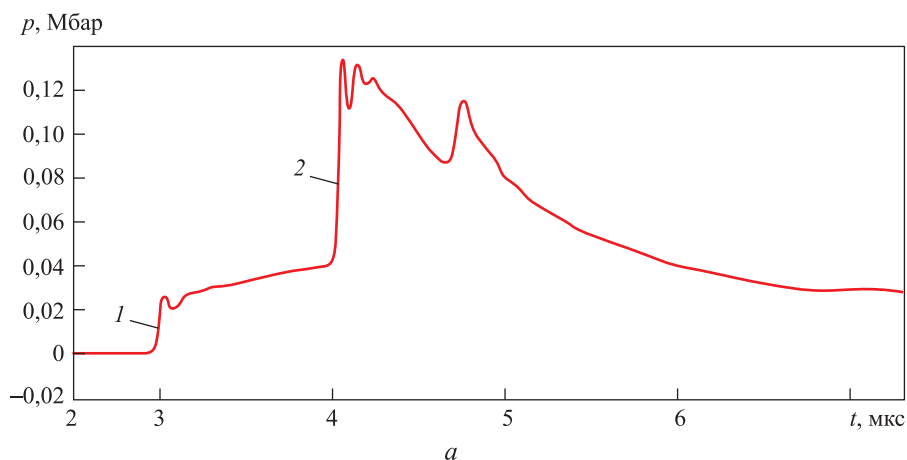


Рис. 5. Зависимости давления от времени, записанные датчиками, находящимися на расстоянии 10 мм (а), 20 мм (б) и 30 мм (в) от оси симметрии ударного взаимодействия:

1 — первая ударная волна, образованная ударом ФВУ по лицевой пластине; 2 — ударная волна, отраженная от тыльной пластины

Это противоречие объясняется тем, что модель Ли — Тарвера в использованном варианте не позволяет учитывать эффекты ударно-волновой десенсibilизации ВВ при двойном или многократном ударно-волновом нагружении, которое возникает при воздействии на слой ВВ, расположенный между металлическими пластинами [3].

В рассматриваемом случае ВВ первоначально нагружается предшествующей ударной волной N , образованной при ударе ФВУ по лицевой пластине (рис. 6). При увеличении толщины лицевой пластины интенсивность этой ударной волны вследствие затухания становится недостаточной для быстрого инициирования детонации. Ударная волна, уплотняя ВВ, уменьшает его чувствительность к последующему воздействию волны сжатия, которая формируется при приближении проникающего ударника к слою ВВ, и ударной волны, отраженной от тыльной пластины. Возбуждение детонации возможно при расширении области A интенсивного превращения ВВ и формировании интенсивной расходящейся ударной волны D , догоняющей предшествующую ударную волну N .

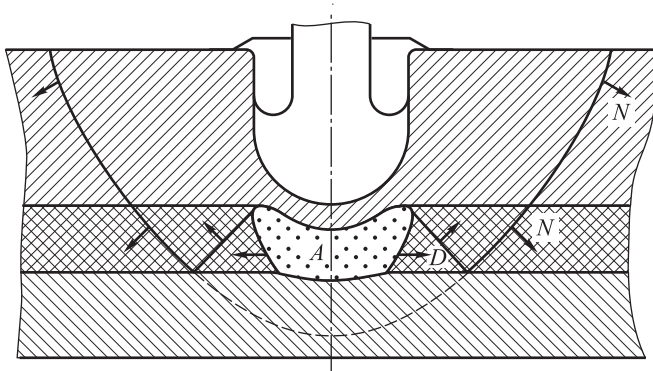


Рис. 6. Волновая картина процесса возбуждения детонации в тонком слое ВВ при воздействии ФВУ:

N — предшествующая ударная волна; A — область интенсивного превращения ВВ; D — расходящаяся ударная волна

Как известно, внесение изменений в алгоритм программы *LS-DYNA*, позволяющих учесть десенсibilизацию ВВ, представляет определенные трудности. Поэтому для учета эффекта ударно-волновой десенсibilизации в задачах возбуждения детонации использовали двухмерный численный решатель «Эрудит» [7], позволяющий численно моделировать двухмерные движения сжимаемой прочной сплошной среды. В этот решатель интегрирована модернизированная кинетика Ли — Тарвера [8], учитывающая возможность десенсibilизации ВВ.

Модернизация кинетики Ли — Тарвера осуществлена путем введения параметра десенсбилизации φ , который подчиняется эволюционному уравнению [8, 9]:

$$\frac{d(\rho\varphi)}{dt} = A\rho\rho(1-\varphi)(\varphi + \varepsilon),$$

где $A > 0$ — константа скорости; $\varepsilon > 0$ — ключевой параметр.

В недесенсбилизированном ВВ $\varphi = 0$, полностью десенсбилизированному состоянию ВВ соответствует равенство $\varphi = 1$. Начальная скорость десенсбилизации исходного ВВ $S(\varphi = 0) = A\rho\varepsilon$. При $p > 0$ параметр десенсбилизации φ с той или иной скоростью стремится к единице.

С помощью параметра φ модифицированы первые два члена уравнения кинетики (2), отвечающие за стадии зажигания и разгорания очагов химической реакции:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \begin{cases} I(1-\lambda)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a(\varphi) \right)^x, & \text{если } \frac{\rho}{\rho_0} > a(\varphi) + 1, \lambda < \lambda_{ig\max}; \\ G_1(1-\lambda)^c \lambda^d p^y, & \text{если } \lambda_{G1\min}(\varphi) < \lambda < \lambda_{G1\max}; \\ G_2(1-\lambda)^e \lambda^g p^z, & \text{если } \lambda > \lambda_{G2\min}; \end{cases}$$

$$a(\varphi) = a_0(1-\varphi) + a_1\varphi;$$

$$\lambda_{G1\min}(\varphi) = \lambda_c\varphi,$$

где a_0, a_1, λ_c — эмпирические коэффициенты кинетики.

Модифицированную таким образом кинетику разложения ВВ использовали в расчетах для учета эффекта ударно-волновой десенсбилизации ВВ.

Параметры состояния смеси компонентов ВВ и продуктов разложения (ПР) в зоне реагирования ВВ рассчитывали в приближении их механического и термического равновесия:

$$p_g = p_s;$$

$$T_g = T_s,$$

где p_g, T_g — давление и температура в ПР; p_s, T_s — давление и температура в ВВ.

Предполагалась также аддитивность удельных объемов и внутренних энергий ВВ и ПР:

$$v = \lambda v_g + (1-\lambda)v_s;$$

$$e = \lambda e_g + (1 - \lambda) e_s,$$

где v_g , e_g — удельный объем и внутренняя энергия ПР; v_s , e_s — удельный объем и внутренняя энергия ВВ.

Для ВВ и ПР использовали уравнение состояния в форме *JWL* (1).

С помощью решателя «Эрудит» были выполнены расчеты процесса возбуждения детонации в тонком слое ВВ согласно схеме, представленной на рис. 1, для толщины лицевой пластины 7 и 6 мм. Результаты расчета для толщины пластины 7 мм показаны на рис. 7 и 8, а для толщины 6 мм — на рис. 9 и 10.

Из анализа этих зависимостей следует, что при воздействии ФВУ на экранированный тонкий слой ПВВ-12М толщиной 6 мм при толщине лицевой пластины 7 мм возбуждения детонации не наблюдается, а при толщине пластины 6 мм наблюдается, что согласуется с экспериментальными данными. При этом детонационная волна формируется на расстоянии, которое больше 20 мм от оси симметрии ударного взаимодействия. Таким образом, учет эффекта десенсбилизации позволяет с помощью численного моделирования получать реалистичные результаты.

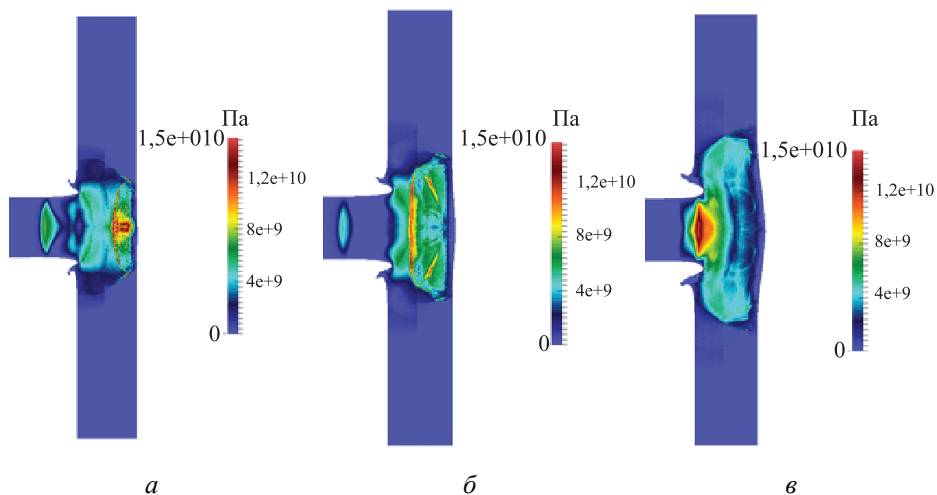


Рис. 7. Распределения поля давления в слое ВВ и пластинах (толщина лицевой пластины 7 мм), полученные с помощью программы «Эрудит»:
a — $t = 3,5$ мкс; *б* — $t = 4,5$ мкс; *в* — $t = 6$ мкс

На рис. 8 приведены зависимости давления от времени, записанные датчиками давления, установленными в плоскости симметрии слоя ВВ.

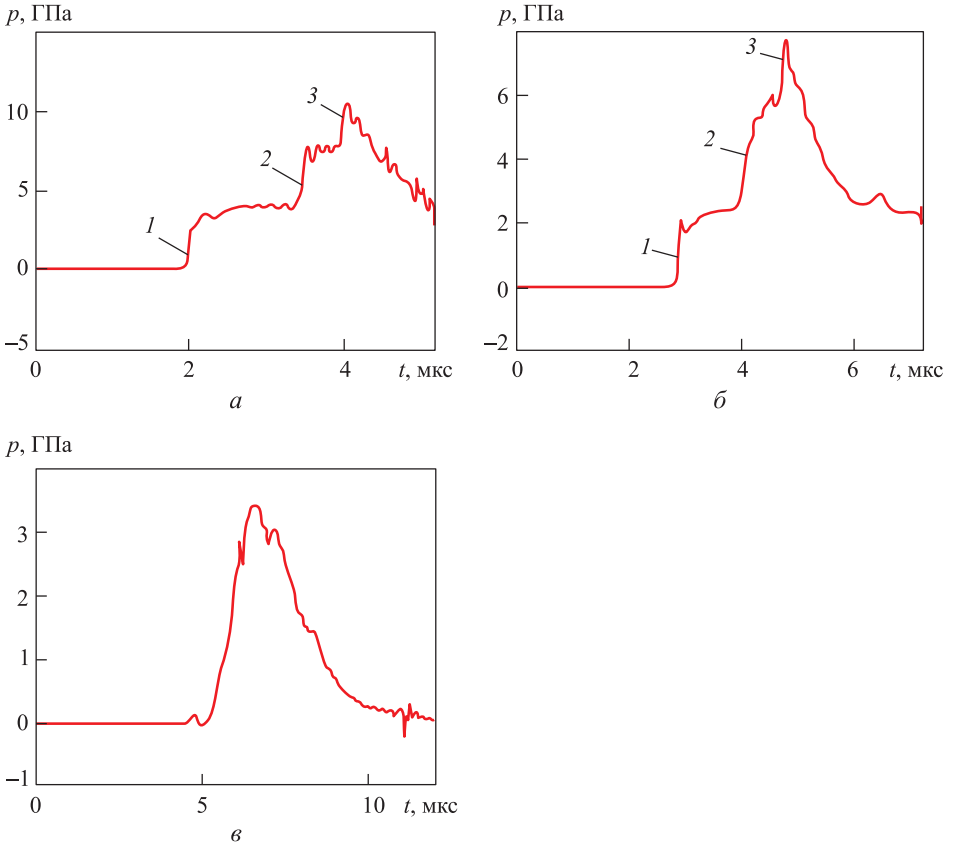


Рис. 8. Зависимости давления от времени, записанные датчиками, находящимися на оси симметрии ударного взаимодействия (а) и на расстоянии 10 мм (б) и 20 мм (в) от оси (толщина лицевой пластины 7 мм):

1 — первая ударная волна; 2 — ударная волна, отраженная от тыльной пластины; 3 — ударная волна, отраженная от лицевой пластины

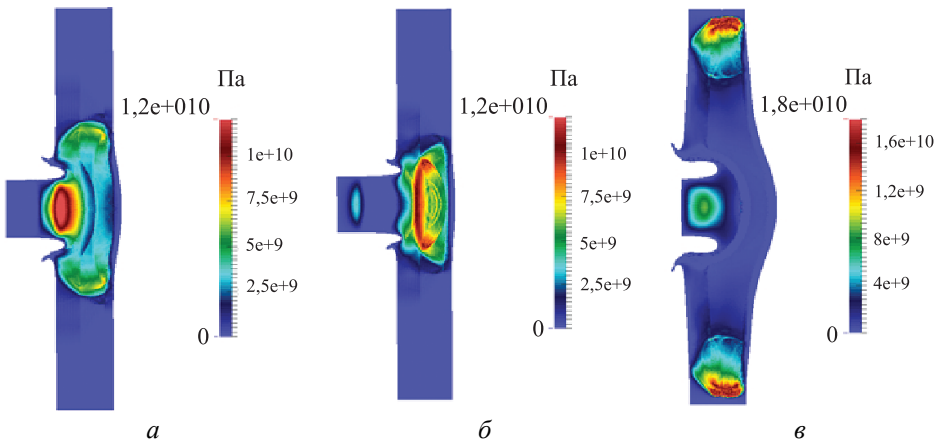


Рис. 9. Распределения поля давления в слое ВВ и пластинах (толщина лицевой пластины 6 мм), полученные с помощью программы «Эрудит»:

а — $t = 4,5$ мкс; б — $t = 6$ мкс; в — $t = 11$ мкс

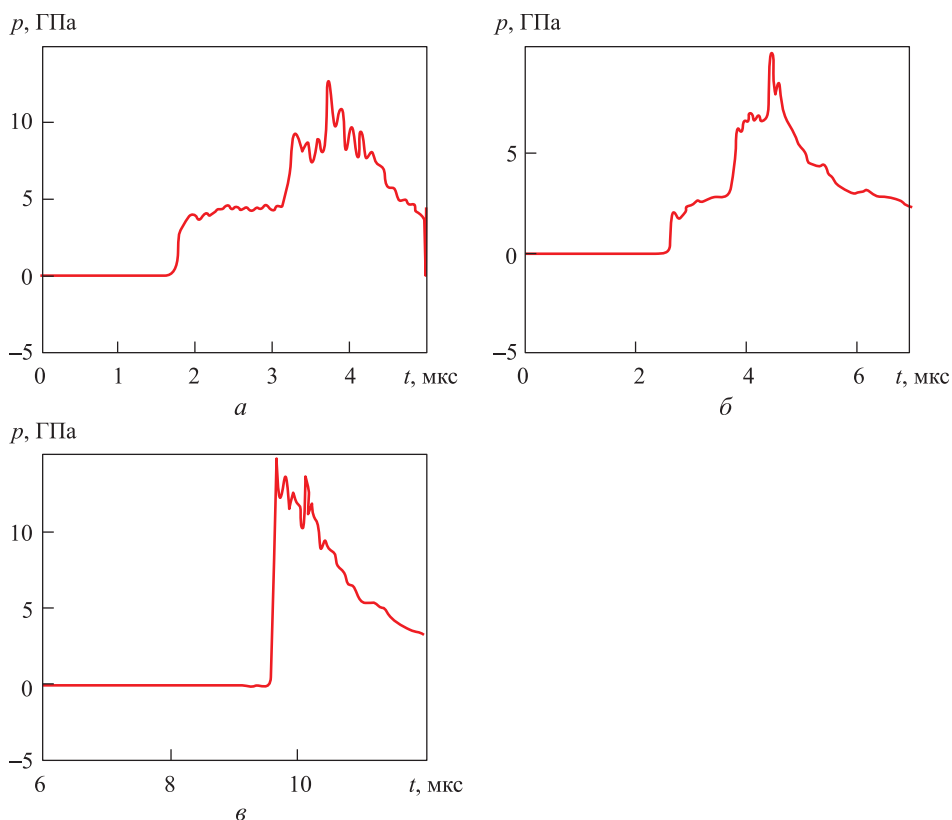


Рис. 10. Зависимости давления от времени, записанные датчиками, находящимися на оси симметрии ударного взаимодействия (*a*) и на расстоянии 10 мм (*б*) и 40 мм (*в*) от оси (толщина лицевой пластины 6 мм)

В результате проведенных исследований показано, что поскольку в кинетике Ли — Тарвера, интегрированной в программу *LS-DYNA*, не учитывается эффект ударно-волновой десенсibilизации, не представляется возможным воспроизвести экспериментальный факт существования максимальной толщины экрана, при превышении которой детонация в заряде ПВВ-12М толщиной 6 мм не возбуждается при воздействии на него ударника диаметром 17,5 мм со скоростью 2,21 км/с. Был разработан метод численного моделирования процесса возбуждения детонации в экранированных тонких слоях ВВ при воздействии высокоскоростных ударников с учетом ударно-волновой десенсibilизации ВВ. Проведенные с помощью этого метода расчеты показали хорошее согласование с экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. 3-е изд. Т. 2. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2002, 656 с.
- [2] Кобылкин И.Ф. Иницирование детонации в экранированных тонких слоях взрывчатых веществ при высокоскоростном воздействии готовых и формируемых взрывом ударников. *Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы*, 2008, № 2, с. 50–56.
- [3] Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. *Возбуждение и распространение взрывных превращений в зарядах взрывчатых веществ*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, 354 с.
- [4] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. 3-е изд. Т. 1. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2002, 823 с.
- [5] Urtiew P.A., Vandersall K.S., Tarver C.M. Shock initiation experiments and modeling of composition B and C-4. *The 13th International Detonation Symposium*. USA, 2006, pp. 632–642.
- [6] Кобылкин И.Ф., Вышинский П.Н., Дорохов Н.С. Иницирование детонации в тонких слоях ВВ, размещенных между металлическими пластинами, при воздействии компактных ударников. *Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Тр. междунар. конф. «XI Харитоновские тематические научные чтения»*. Саров, 2009, с. 100–105.
- [7] Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И., Ручко А.М., Сотский М.Ю., Федоров С.В. Расчет проникания недеформируемых ударников в малопрочные среды с использованием данных пьезоакселерометрии. *Журнал технической физики*, 2011, т. 81, вып. 7, с. 94–104.
- [8] DeOliveira G., Kapila A.K., Schwendeman D.W., Bdzil J.B., Henshow W.D., Tarver C.M. Detonation Diffraction, Dead Zones and Ignition Model. *The 13th International Detonation Symposium*. USA, 2006, pp. 534–542.
- [9] Vandersall K., Garsia F., Tarver C., Fried L. Shock Desensitization Experiments and Reactive Flow Modeling on Self-Sustaining LX-17 Detonation Waves. *The 15th International Detonation Symposium*. USA, 2014, pp. 114–122.

Статья поступила в редакцию 31.03.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кобылкин И.Ф., Петюков А.В. Проявление эффекта ударно-волновой десенсибилизации при возбуждении детонации в тонких слоях взрывчатого вещества высокоскоростными ударниками. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mlgp/1383.html>

Кобылкин Иван Федорович родился в 1951 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1974 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 200 научных работ в области теории ВВ, взрывных технологий, химической физики горения и взрыва, материалов и структур легкой бронезащиты, динамической защиты бронетехники. e-mail: kobytkin_ivan@mail.ru

Петюков Андрей Вячеславович родился в 1990 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2013 г. Аспирант кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 10 научных работ в области численного моделирования процессов физики взрыва. e-mail: andre1524@rambler.ru

Manifestation of the effect of shock wave desensitization upon projectile detonation initiation in explosive thin layers

© I.F. Kobylkin, A.V. Petukov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article describes numerical modeling detonation initiation in shielded thin layers of explosives exposed to high-speed projectiles with regard to their shock-wave desensitization occurring due to their pre-compression by the shock wave generated at the initial stage of projectile penetration in the shielded layer of explosive. In the course of solving the problem by using LS-DYNA it was found that due to lack of accountability of shock wave desensitization effect in Lee-Tarver kinetics, integrated into the program LS-DYNA, it is not possible to reproduce the experimental fact of existence of the maximum screen thickness, above which detonation of the charge PVV-12M, of 6 mm thick is not initiated when exposed to the projectile with the diameter of 17.5 mm, at the speed of 2.21 km/s. To account for the effect of shock wave desensitization in problems of detonation initiation two-dimensional numerical solver of problems of mechanics of compressible solid continuum "Erudit", developed by S.V. Fedorov in the BMSTU, was used. Modernized Lee-Tarver kinetics of explosive decomposition, regarding for the possibility of desensitization of explosives under non-monotonic loading, was integrated into this solver. The developed method of numerical simulation allows the experimental data to be reproduced. As the calculations showed the detonation initiation doesn't occur under the projectile influence on a shielded thin layer of PVV-12M mm with the thickness of 6 mm and a faceplate thickness of 7 mm, but at a thickness of 6 mm detonation initiation occurs, which is consistent with experimental data.

Keywords: *detonation initiation, shock-wave, desensitization, numerical modeling, kinetics of decomposition, explosive thin layer.*

REFERENCES

- [1] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva* [Physics of Explosion]. Vol. 2. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2002, 656 p.
- [2] Kobylkin I.F. *Boepripasy i vysokoenergeticheskie kondensirovannyye sistemy — Ammunition and high-energy condensed systems*, 2008, no. 2, pp. 50–56.
- [3] Kobylkin I.F., Selivanov V.V. *Vozbuzhdenie i rasprostranenie vzryvnykh prevrashcheniy v zaryadakh vzryvchatykh veshchestv* [Initiation and Propagation of Explosive Transformations in an Explosive Charge]. Moscow, BMSTU Publ., 2015, 354 p.
- [4] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva* [Physics of Explosion]. Vol. 1. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2002, 823 p.
- [5] Urtiew P.A., Vandersall K.S., Tarver C.M. Shock initiation experiments and modeling of composition B and C-4. *The 13th International Detonation Symposium*. Norfolk (USA), 2006, pp. 632–642.
- [6] Kobylkin I.F., Vyshinskiy P.N., Dorokhov N.S. *Iniitsirovanie detonatsii v tonkikh sloyakh vzryvchatykh veshchestv, razmeshchennykh mezhdru metallicheskimy platinami pri vozdeystvii kompaktnykh udarnikov* [Initiation of Detonation of Explosives in Thin Layers, Placed between the Metal Plates under the Action of Compact Projectiles]. In: *Trudy mezhdunarodnoy*

konferentsii "XI Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya". Ekstremalnye sostoyaniya veshchestva. Detonatsiya. Udarnye volny. [Proceedings of the International conference: XI Kharitonov Memorial Topical Scientific Lectures. Extreme States of Matter. Detonation. Shock Waves]. Sarov, 2009, pp. 100–105.

- [7] Veldanov V.A., Markov V.A., Pusev V.I., Ruchko A.M., Sotskiy M.Yu., Fedorov S.V. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*, 2011, vol. 81, no. 7, pp. 94–104.
- [8] DeOliveira G., Kapila A.K., Schwendeman D.W., Bdzil J.B., Henslow W.D., Tarver C.M. Detonation Diffraction, Dead Zones and Ignition Model. *The 13th International Detonation Symposium*. USA, 2006, pp. 534–542.
- [9] Vandersall K., Garsia F., Tarver G., Fried L. Shock Desensitization Experiments and Reactive Flow Modeling on Self-Sustaining LX-17 Detonation Waves. *The 15th International Detonation Symposium*. USA. 2014. pp. 114–122.

Kobylykin I.F. (b. 1951) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1974. Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of High-Precision Airborne Devices at the Bauman Moscow State Technical University. The author of about 200 scientific works including 11 monographs in the field of theory of explosives, blasting technologies, chemical physics of combustion and explosion, materials and structures of light armor protection, explosive reactive armors of combat systems – armored vehicles. e-mail: kobylykin_ivan@mail.ru

Petukov A.V. (b. 1990) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2013. Postgraduate student of the Department of High-Precision Airborne Devices at the Bauman Moscow State Technical University. The author of more than 10 publications in the field of numerical modeling the physics of the explosion. e-mail: andre1524@rambler.ru