

Возбуждение детонации в зарядах взрывчатого вещества, ограниченных оболочками, при высокоскоростном воздействии ударников

© И.Ф. Кобылкин, А.В. Петюков, И.А. Яковенко

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

Представлены результаты численного моделирования процесса возбуждения детонации в зарядах взрывчатого вещества (ВВ), ограниченных стальными оболочками толщиной 4 и 12 мм, при воздействии цилиндрических ударников массой 18,6 г в диапазоне скоростей 750...2 300 м/с. При воздействии высокоскоростных ударников на ограниченные оболочкой заряды в ВВ образуются сильные ударные волны (УВ), которые могут инициировать детонацию. Возникнет ли детонация или нет, зависит не только от амплитуды и длительности УВ, которые, в свою очередь, определяются скоростью и диаметром ударника, но и от характера ограничения. Получено, что при воздействии ударников на заряды ВВ в тонкостенных оболочках детонация возникает в УВ, образующихся на начальной стадии ударного взаимодействия, с малым временем задержки, а при воздействии на заряды ВВ в толстостенных оболочках возбуждение детонации на пределе происходит с заметной задержкой при пересечении УВ, отраженных от стенок оболочки. В исследованных случаях критическая скорость ударника, необходимая для возбуждения детонации в зарядах ВВ в толстостенной оболочке, оказалась меньше, чем для зарядов ВВ в тонкостенной оболочке. Разработана численная методика, которую можно использовать в дальнейших исследованиях для определения критических условий ударно-волнового возбуждения детонации в различных оболочечных взрывных устройствах.

Ключевые слова: заряд в оболочке, возбуждение детонации, ударная волна, численное моделирование, кинетика разложения.

Введение. Несмотря на многочисленные работы, посвященные изучению механизмов и критериев возбуждения и распространения взрывных превращений в зарядах ВВ, ограниченных оболочками, при высокоскоростном ударном воздействии компактных ударников (КУ) [1, 2], остается много нерешенных вопросов. В частности, в недостаточной степени изучены механизмы и критерии ударно-волнового возбуждения интенсивных ответных реакций (детонации, частичной детонации) в снаряжении боеприпасов при высокоскоростном воздействии КУ массой около 20 г в диапазоне скоростей $V = 1\ 800 \dots 2\ 600$ м/с. Именно такие характеристики воздействия регламентирует стандарт НАТО STANAG-4496 для испытания малочувствительных боеприпасов на прострел. Кроме того, менее интенсивное воздействие КУ в диапазоне скоростей 500...1 500 м/с может быть использовано для возбуждения взрывных превращений в снаряжении различных оболочечных взрывных устройств при гуманитарном разминировании [3]. Для проектирования соответствующих систем разминирования необхо-

димом знание механизмов и критериев возбуждения взрывных превращений, вызывающих разрушение уничтожаемых боеприпасов.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования возбуждения детонации в зарядах ВВ, ограниченных оболочками различной толщины, при высокоскоростном воздействии КУ.

Постановка задачи. На начальной стадии для исследования были выбраны два типа оболочечных взрывных устройств: тонкостенная модель инженерной мины, снаряженной составом ТГ 40/60 (рис. 1, а), и толстостенная модель осколочно-фугасного снаряда (ОФС), снаряженного ТНТ (рис. 1, б).

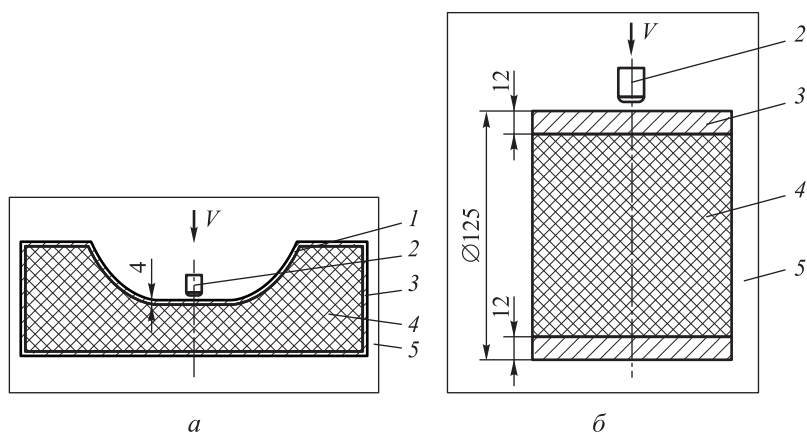


Рис. 1. Расчетные схемы:
 а — модель мины (ВВ — ТГ 40/60); б — модель ОФС (ВВ — ТНТ)

Расчетная модель содержит четыре основных элемента: ударник 2, ВВ 4, стальную оболочку 3 и окружающий воздух 5. Материал ударника — среднеуглеродистая сталь, масса — 18,6 г. Форма ударника представлена на рис. 2. Толщина оболочки (медная облицовка 1) в тонкостенной модели — 4 мм, в толстостенной — 12 мм.

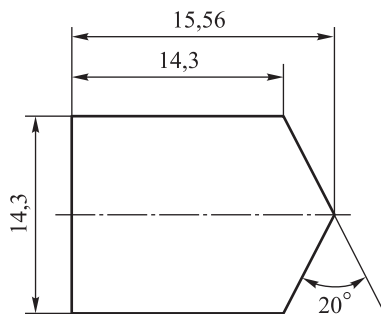


Рис. 2. Форма и размеры ударника

Численное моделирование выполнено в программе *LS-DYNA* методом *ALE-2D*. В качестве уравнения состояния ВВ использовалось уравнение *JWL* [2]:

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

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.

Таблица 1

Коэффициенты уравнения *JWL* для ТГ 40/60 и ТНТ

Взрывчатое вещество и продукты детонации	A , ГПа	B , ГПа	R_1	R_2	Γ
ТГ 40/60	77 810	-5,031	11,3	1,13	0,8938
ПД ТГ 40/60	524,2	7,68	4,2	1,1	0,5
ТНТ	1 798	-93,1	6,2	3,1	0,8926
ПД ТНТ	371,2	3,231	4,15	0,95	0,3

Для описания кинетики разложения ВВ использовали модель Ли — Тарвера, в соответствии с которой уравнение скорости разложения ВВ

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

где λ — массовая доля ВВ; ρ_0, ρ — начальная и текущая плотность ВВ 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 для ТГ 40/60 и ТНТ, приведенные в табл. 2 и 3 соответственно [4, 5].

Для каждой расчетной схемы рассмотрено три варианта скорости КУ: по модели мины — 2 530, 1 830 и 1 000 м/с; по модели ОФС —

1 830, 1 000 и 750 м/с. Скорость ударника варьировалась в целях определения критической скорости инициирования. Воздействие ударника осуществлялось по нормали к заряду ВВ в оболочке.

Таблица 2

Коэффициенты кинетики Ли — Тарвера для ТГ 40/60

$I, \text{мкс}^{-1}$	$4 \cdot 10^6$	$G_1, \text{Мбар}^{-y} \cdot \text{мкс}^{-1}$	140	$G_2, \text{Мбар}^{-z} \cdot \text{мкс}^{-1}$	1000
b	0,667	c	0,222	e	0,222
a	0,0367	d	0,333	g	1,0
x	7,0	y	2,0	z	3,0
$\lambda_{ig\max}$	0,022	$\lambda_{G1\max}$	0,7	$\lambda_{G2\min}$	0

Таблица 3

Коэффициенты кинетики Ли — Тарвера для ГНТ

$I, \text{мкс}^{-1}$	$8 \cdot 10^8$	$G_1, \text{Мбар}^{-y} \cdot \text{мкс}^{-1}$	11,2	$G_2, \text{Мбар}^{-z} \cdot \text{мкс}^{-1}$	820
b	0,667	c	0,667	e	0,333
a	0,065	d	0,667	g	0,333
x	6,0	y	1,0	z	3,0
$\lambda_{ig\max}$	0,015	$\lambda_{G1\max}$	1,0	$\lambda_{G2\min}$	0

Результаты расчетов. Наиболее характерные результаты, полученные при расчете вариантов, в которых возбуждение детонации либо происходило, либо не происходило, приведены на рис. 3–10. На рис. 3 и 5 представлены распределения поля давления в различные моменты времени для воздействия КУ соответственно на модель мины и на модель снаряда при скорости 1 830 м/с. Анализ зависимостей давления от времени, записанных датчиками, установленными на оси симметрии в слое ВВ (рис. 4 и 6), показал, что при скорости воздействия КУ 1 830 м/с детонация возбуждается в снаряжении как мины, так и ОФС, причем в толстостенной модели снаряда это происходит с некоторой задержкой.

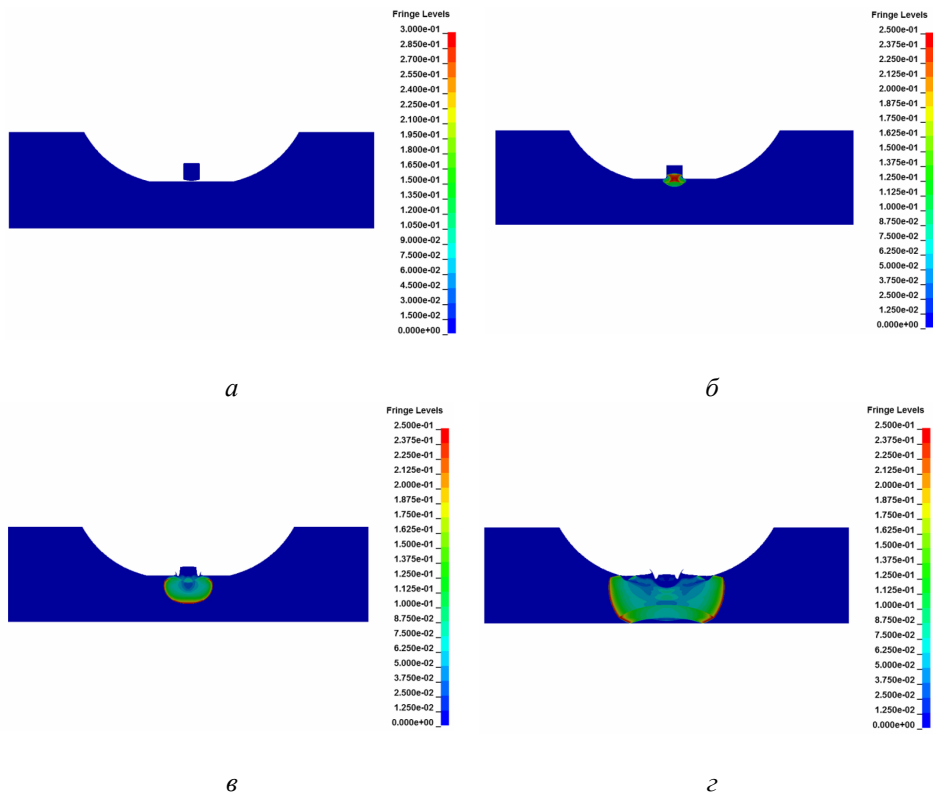


Рис. 3. Распределения поля давления p , Мбар, в заряде ВВ модели мины (ТГ 40/60) в моменты времени $t = 0; 2,5; 4,5; 8,5$ мкс (*a-г*) при возбуждении детонации. Скорость КУ 1 830 м/с

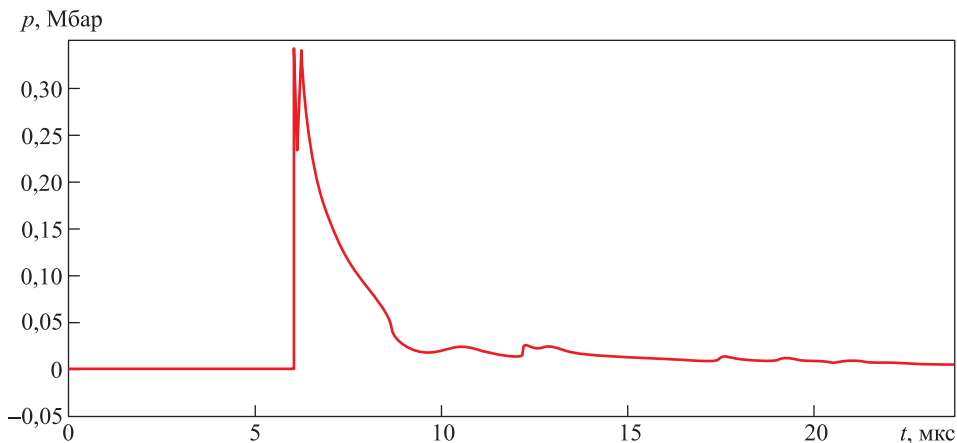


Рис. 4. Зависимость давления от времени, записанная датчиками, находящимися на оси симметрии на расстоянии 39 мм от верхней границы торцевой оболочки мины. Скорость КУ 1 830 м/с

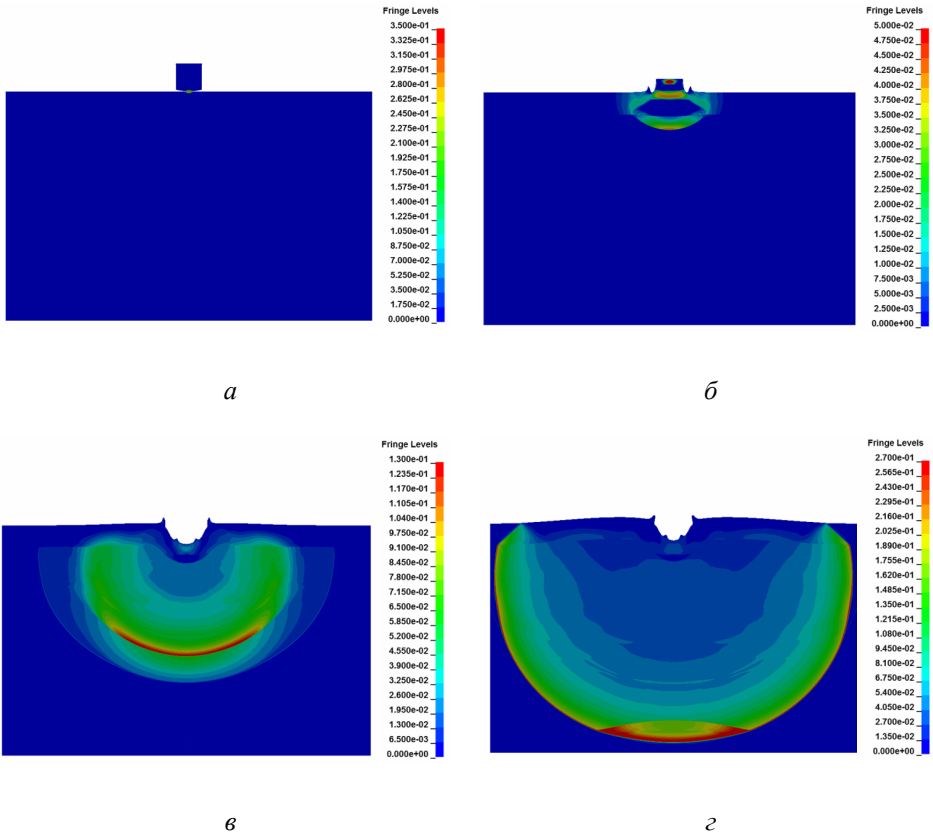


Рис. 5. Распределения поля давления p , Мбар, в заряде ВВ модели ОФС (ТНТ) в моменты времени $t = 0; 4,75; 18,75; 29,75$ мкс ($a-g$) при возбуждении детонации. Скорость КУ 1 830 м/с

Воздействие КУ на модель мины со скоростью, меньшей 1 000 м/с, не приводит к возбуждению детонации в заряде ТГ 40/60. Соответствующие распределения поля давления в расчетной области в различные моменты времени приведены на рис. 7, зависимости давления от времени, записанные датчиками, установленными на оси симметрии в слое ВВ, — на рис. 8. Отметим, что воздействие КУ с той же скоростью на толстостенную модель снаряда, снаряженную ТНТ, сопровождается возбуждением детонации в заряде ВВ. При уменьшении скорости ударника до 750 м/с детонация не возбуждается и в снаряжении модели ОФС. Как следует из анализа профилей давления и зависимостей давления от времени, записанных датчиками, в этом случае ударная волна в заряде ВВ быстро затухает (рис. 9 и 10).

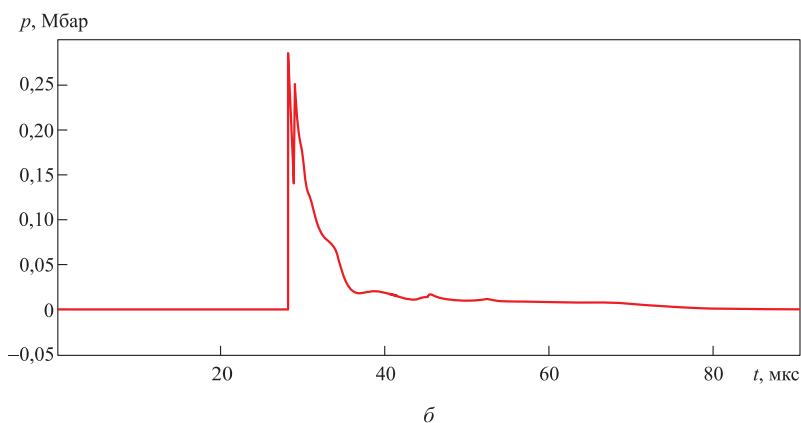
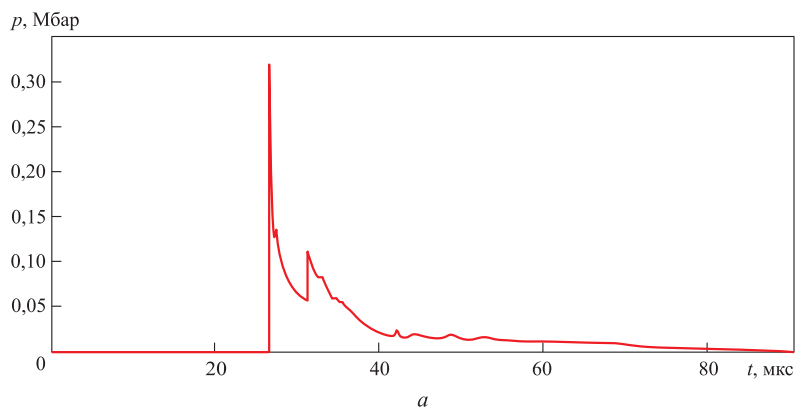


Рис. 6. Зависимости давления от времени, записанные датчиками, находящимися на оси симметрии на расстоянии 100 мм (а) и 110 мм (б) от верхней границы оболочки снаряда. Скорость КУ 1 830 м/с

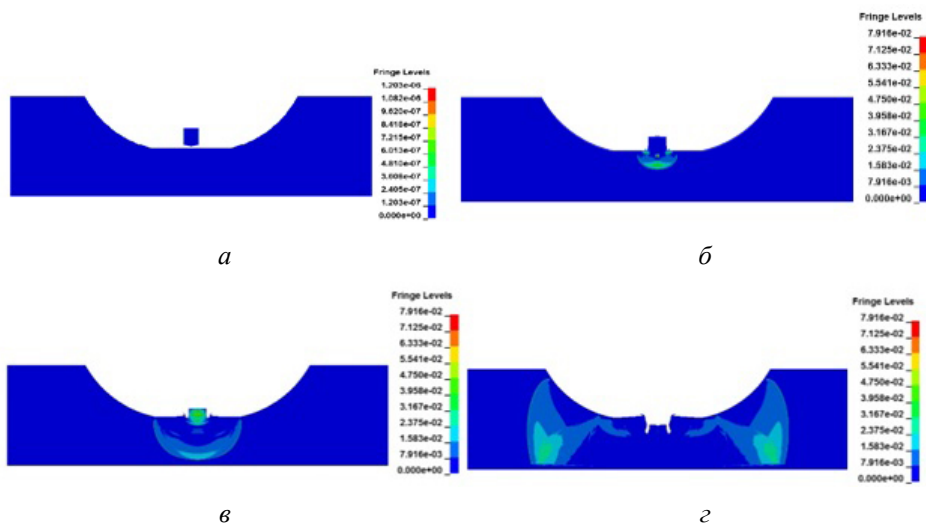
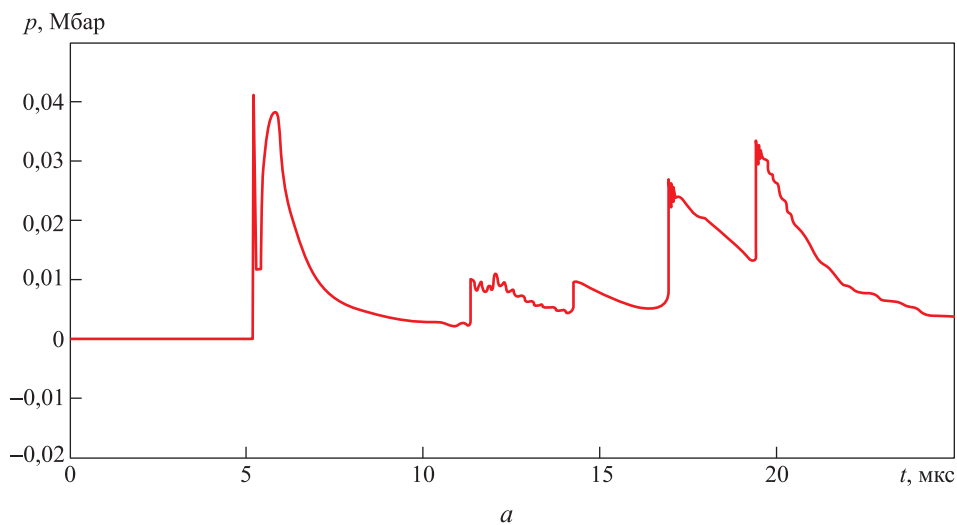
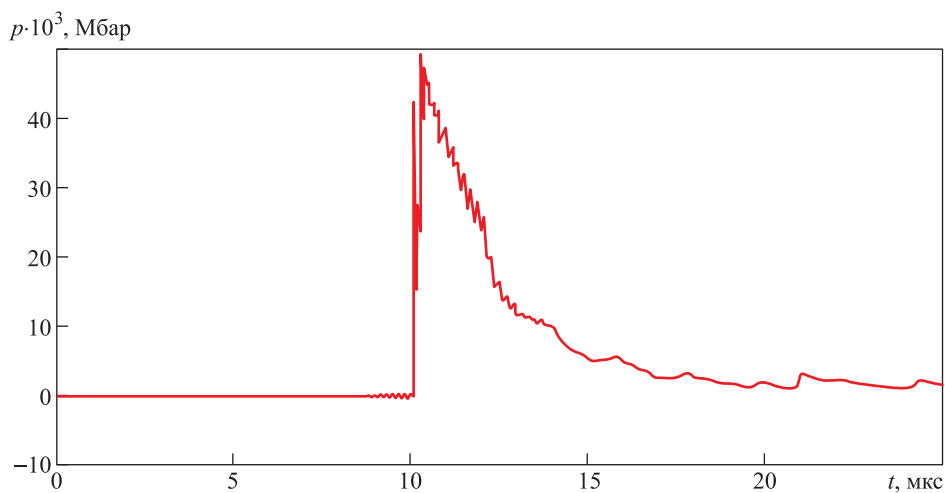


Рис. 7. Распределения поля давления p , Мбар, в заряде ВВ модели мины (ТГ 40/60) в моменты времени $t = 0; 5; 10; 28$ мкс (а–г) при отсутствии возбуждения детонации. Скорость КУ 1 000 м/с



a



б

Рис. 8. Зависимости давления от времени, записанные датчиками, находящимися на оси симметрии на расстоянии 19 мм (*a*) и 39 мм (*б*) от нижней границы торцевой оболочки мины. Скорость КУ 1 000 м/с

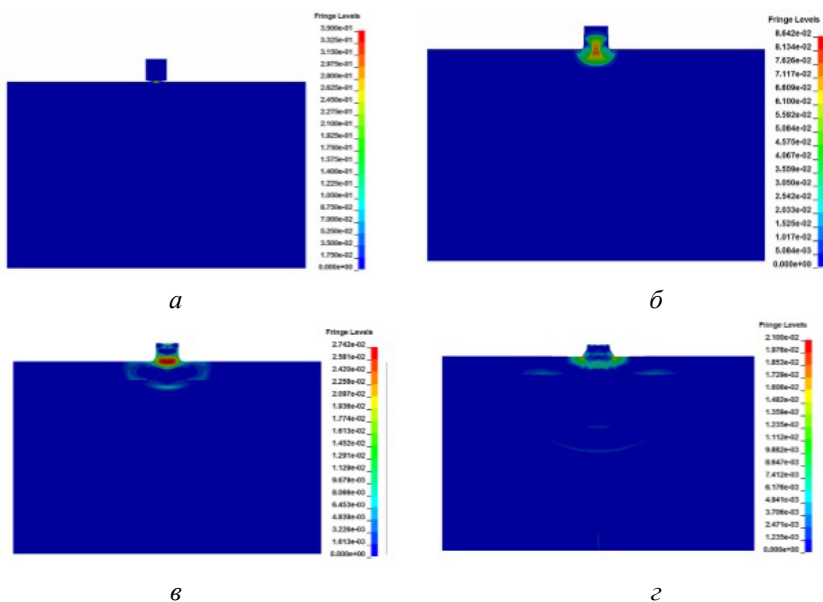


Рис. 9. Распределения поля давления p , Мбар, в заряде ВВ модели ОФС (ГНТ) в моменты времени $t = 0; 2,5; 5,5; 20$ мкс (*a–г*) при отсутствии возбуждения детонации. Скорость КУ 750 м/с

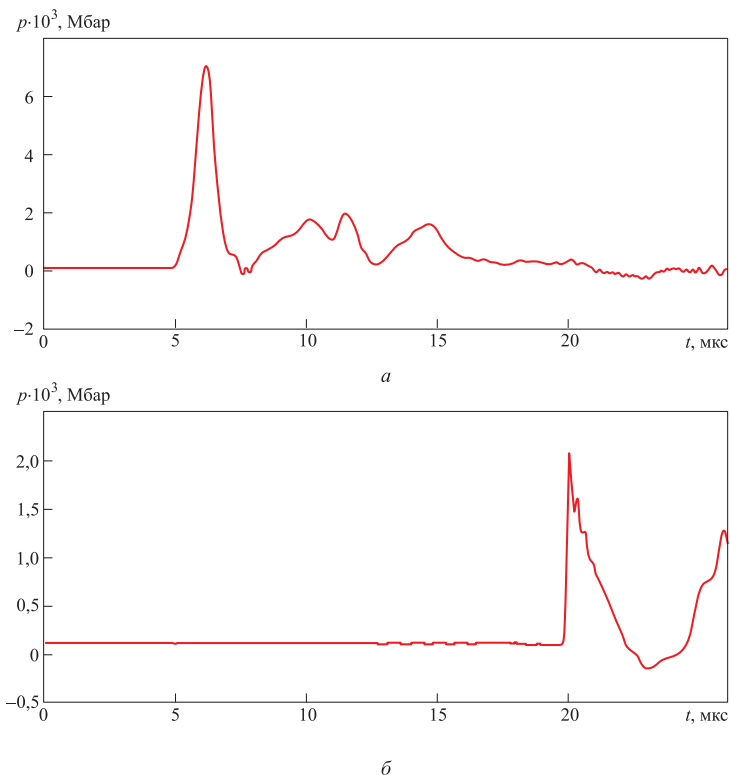


Рис. 10. Зависимости давления от времени, записанные датчиками, находящимися на оси симметрии на расстоянии 20 мм (*a*) и 60 мм (*б*) от верхней границы оболочки снаряда. Скорость КУ 750 м/с

Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчетов воздействия КУ на модели мины и ОФС

Объект исследования	Скорость КУ, м/с	Реакция
Модель мины (ВВ — ТГ 40/60)	2 530	Детонация
	1 830	
	1 000	Нет реакции
Модель ОФС (ВВ — ТНТ)	1 830	Детонация
	1 000	
	750	Нет реакции

С помощью разработанной методики выполнено численное моделирование ударно-волнового возбуждения детонации в заряде ТГ 40/60, размещенном в замкнутой толстостенной оболочке (рис. 11), при воздействии ударника с полусферическим торцом $\varnothing 17,5 \times 30,75$ мм со скоростью 1 507 м/с. Такой вариант воздействия был экспериментально исследован в работе [4]. Оказалось, что на пределе возбуждения при толщине крышки $T = 20$ мм детонация возбуждается на оси заряда при пересечении УВ, отраженных от стенок оболочки, с заметной задержкой (рис. 12 и 13). В результате этого пересечения давление в ВВ резко возрастает, что и приводит к возбуждению детонации. Зависимости давления от времени для данного расчетного случая приведены на рис. 14. При толщине крышки $T = 30$ мм детонация не возбуждается.

Полученные результаты согласуются с известными экспериментальными данными [1–4].

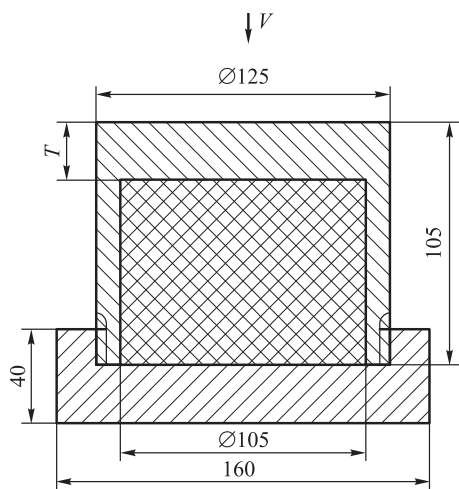


Рис. 11. Схема расчета воздействия КУ на заряд ВВ (ТГ 40/60) в замкнутой толстостенной оболочке

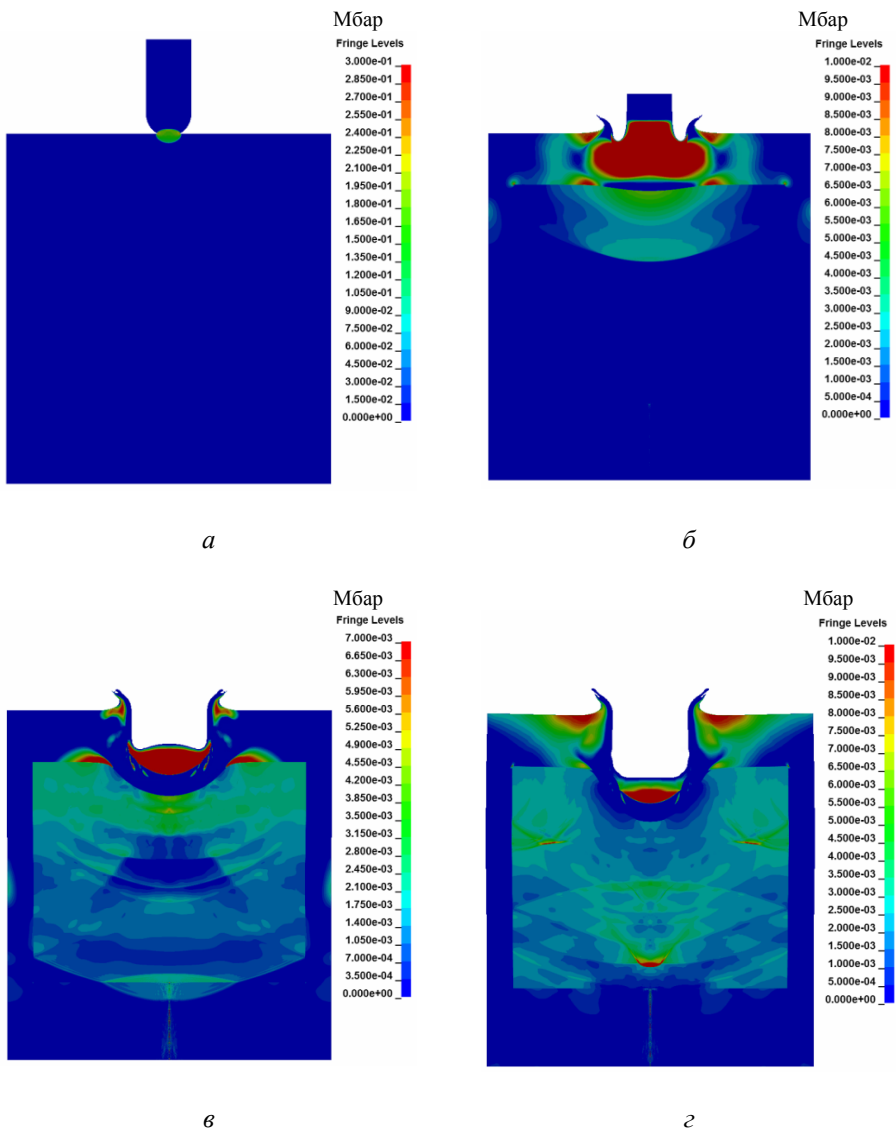


Рис. 12. Конфигурация ударных волн при возбуждении детонации в заряде ВВ (ТГ 40/60) в моменты времени $t = 0; 14,7; 37; 50$ мкс (*a–г*)

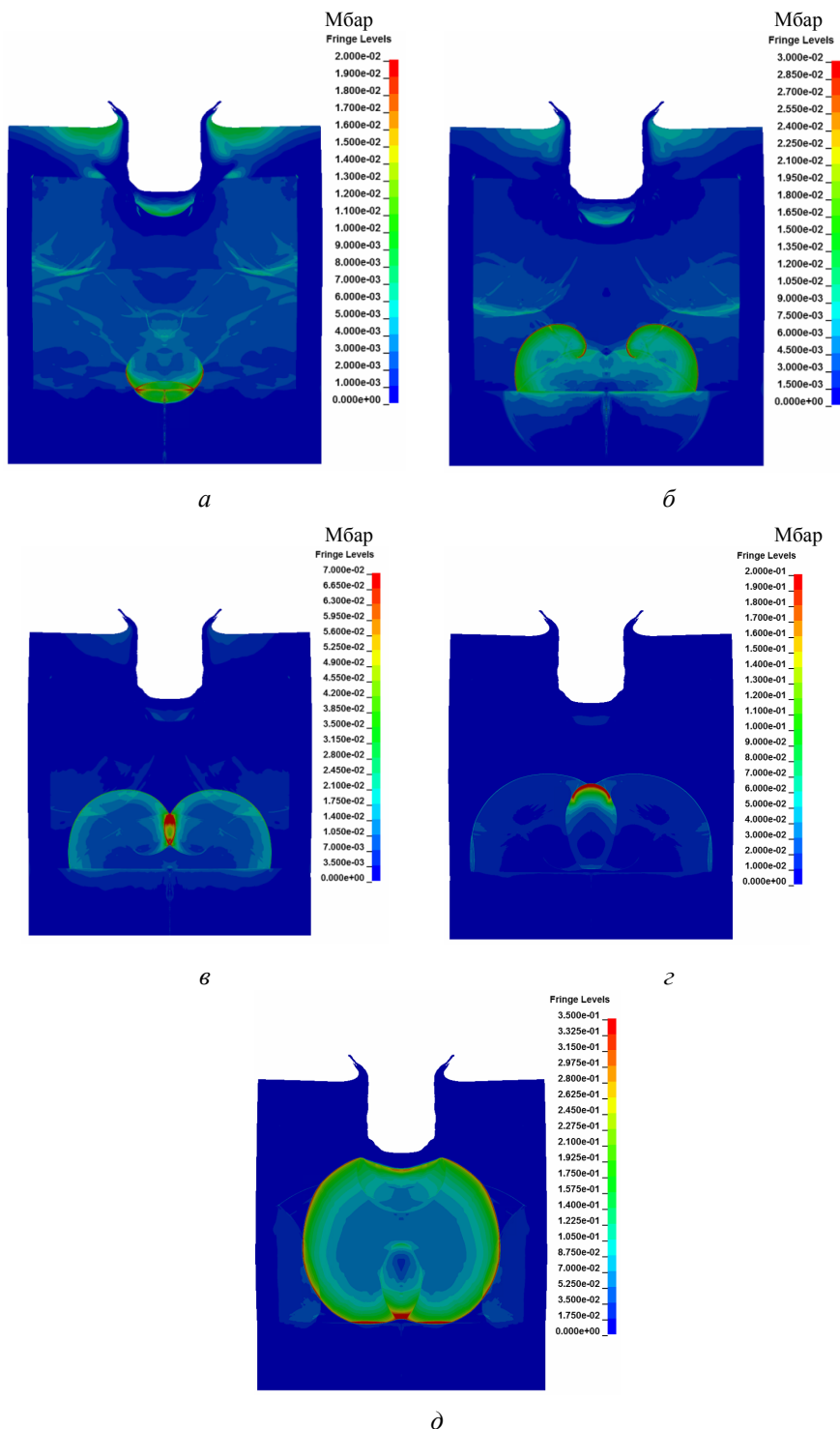


Рис. 13. Конфигурация ударных волн при возбуждении детонации в заряде ВВ (ТГ 40/60) в моменты времени $t = 54; 59; 61; 63; 67,25$ мкс (*a–д*)

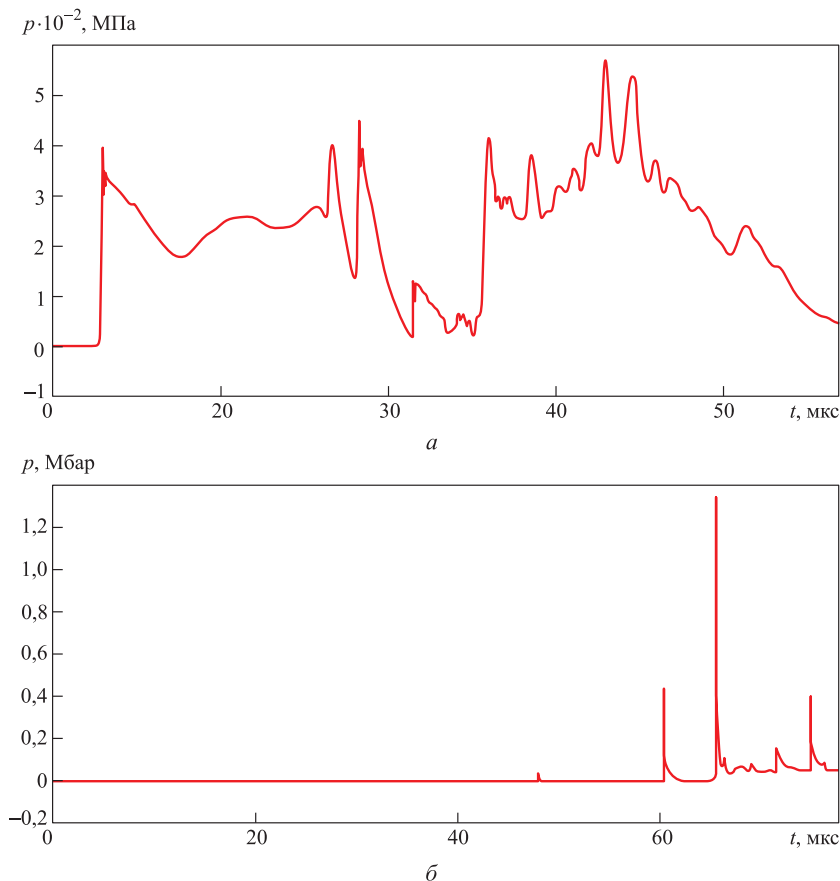


Рис. 14. Зависимости давления от времени, записанные датчиками, находящимися на оси симметрии на расстоянии 45 мм (а) и 85 мм (б) от верхней границы оболочки

Заключение. При воздействии высокоскоростных ударников на ограниченные оболочкой заряды ВВ образуются сильные УВ; при некоторых условиях они могут инициировать детонацию. Возникнет ли детонация или нет, зависит не только от амплитуды и длительности УВ, которые определяются скоростью и диаметром ударника, но и от характера ограничения.

Анализ результатов расчета показал, что при воздействии ударников на заряды ВВ в тонкостенных оболочках детонация возникает в УВ, образующихся на начальной стадии ударного взаимодействия, с малым временем задержки, тогда как при воздействии на заряды ВВ в толстостенных оболочках возбуждение детонации на пределе происходит с заметной задержкой при пересечении УВ, отраженных от стенок оболочки. Поскольку давление в отраженных УВ более чем вдвое превышает давление в падающих УВ, в исследованных случаях критическая скорость ударника, необходимая для возбуждения детонации в зарядах ВВ в толстостенной оболочке, оказывается меньше

1 000 м/с, в то время как для зарядов ВВ в тонкостенной оболочке она превышает 1 000 м/с.

Таким образом, разработанную численную методику можно использовать в дальнейших исследованиях для определения критических условий ударно-волнового возбуждения детонации в различных оболочечных взрывных устройствах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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.
- [2] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. 3-е изд. Т. 1. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2002, 823 с.
- [3] Almond R., Murray S. Projectile Attack on Surface Scattered Munitions. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2002, vol. 31, no. 2, pp. 83–88.
- [4] Zhang X.F., Huang Z.X. Study on shelled explosive initiated by explosive formed projectile. *23rd International Symposium on Ballistics*. Tarragona, Spain, 2007, pp. 1197–1204.
- [5] Lee E.L., Tarver C.M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives. *Phys. Fluids*, 1980, no. 23, pp. 2362–2372.

Статья поступила в редакцию 29.03.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кобылкин И.Ф., Петюков А.В., Яковенко И.А. Возбуждение детонации в зарядах взрывчатого вещества, ограниченных оболочками, при высокоскоростном воздействии ударников. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 3.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mlgp/1377.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 взрывчатых веществ, взрывных технологий, химической физики горения и взрыва, материалов и структур легкой бронезащиты, динамической защиты бронетехники. e-mail: kobylkin_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

Яковенко Ирина Александровна родилась в 1989 г., окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2014 г. Аспирантка кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: i.a.yakovenko@yandex.ru

The projectile impact initiation of the cased high explosive charges

© I.F. Kobylkin, A.V. Petukov, I.A. Yakovenko

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article describes the results of numerical simulation of the process of shock initiation in the charges of explosive, cased in steel shells with the thickness of 4 and 12 mm, by cylindrical projectiles weighing 18.6 g moving in the speed range of 750 – 2,300 m/s. The powerful shock waves that can initiate detonation are generated when the cased high explosive charges are exposed to high-speed projectiles. Whether there will be detonation or not, depends not only on the amplitude and duration of shock wave, which in turn are determined by the speed and the diameter of the projectile, but also on the nature of the restrictions. It was found that under the influence of the projectiles on charges of explosives in thin shells the detonation occurs in the shock waves produced at the initial stage of minimum-delayed shock interaction, and under the impact of the projectiles on charges of explosives in thick shells the detonation initiation at the limit occurs with a noticeable delay as shock waves reflected from shell wall are crossing. Since the pressure in the reflected shock waves is twice as much as the pressure in the incident shock waves, the critical projectile velocity needed for initiating detonation of explosive charges in a thick-walled shell is proved to be less than for explosive charges in a thin-walled shell. Numerical techniques that can be used in future studies for determining the critical conditions of shock wave detonation initiation in various cased explosive devices were developed.

Keywords: *cased high explosive charge, detonation initiation, shock wave, numerical modeling, decomposition kinetics.*

REFERENCES

- [1] Kobylkin I.F., Selivanov V.V. *Vozbuzhdenie i rasprostranenie vzryvnykh prevrascheniy v zaryadakh vzryvchatykh veschestv* [Initiation and Propagation of Explosive Transformations in an Explosive Charge]. Moscow, BMSTU Publ., 2015, 354 p.
- [2] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva* [Physics of Explosion] 3rd ed. Vol. 1. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2002, 823 p.
- [3] Almond R., Murray S. Projectile Attack on Surface Scattered Munitions. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2002, vol. 31, no. 2, pp. 83–88.
- [4] Zhang X.F., Huang Z.X. Study on shelled explosive initiated by explosive formed projectile. *23rd International Symposium on Ballistics*. Tarragona, Spain, 2007, pp. 1197–1204.
- [5] Lee E.L., Tarver C.M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives. *Phys. Fluids*, 1980, no. 23, pp. 2362–2372.

Kobylkin 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, dynamical protection of armored vehicles.
e-mail: kobylkin_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 of the processes of the explosion physics.
e-mail: andre1524@rambler.ru

Yakovenko I.A. (b. 1989) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2014. Postgraduate student of the Department of High-Precision Airborne Devices at the Bauman Moscow State Technical University. e-mail: i.a.yakovenko@yandex.ru