

ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ В ЗАРЯДАХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМИ УДАРНИКАМИ С КОНИЧЕСКОЙ ГОЛОВНОЙ ЧАСТЬЮ

И.Ф. Кобылкин

kobylkin_ivan@mail.ru

И.А. Павлова

i.a.yakovenko@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Приведены результаты численного моделирования взаимодействия ударников с конической формой головной части с разными углами раствора и оболочечными взрывными устройствами и снаряженными составом В. Определены критические скорости возбуждения детонации при воздействии ударников с конической формой головной части с углами при вершине 30, 45, 60 и 90° при взаимодействии с зарядами взрывчатых веществ в оболочке толщиной 5 мм и значение коэффициента формы для ударников с конической головной частью. Показано, что ударники с острой конической головной частью имеют меньшую инициирующую способность вследствие того, что их воздействие приводит к образованию во взрывчатых веществах волн сжатия с плавным профилем нарастания давления

Ключевые слова

Заряд, взрывчатое вещество, оболочка, возбуждение детонации, инициирование, ударная волна, численное моделирование, кинетика разложения

Поступила в редакцию 02.12.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Введение. Необходимость изучения процесса возбуждения детонации в снаряжении оболочечных взрывных устройств (ВУ) при воздействии высокоскоростных комплексных ударников (КУ) с конической головной частью (ГЧ) обусловлена следующими обстоятельствами. Во-первых, при проникании через оболочку ВУ или защитные преграды скорость КУ конической ГЧ уменьшается незначительно, поэтому такие КУ начинают взаимодействовать с зарядами взрывчатых веществ (ВВ) с большей скоростью по сравнению с ударниками с плоским торцом или полусферической ГЧ. Во-вторых, согласно действующим стандартам, уязвимость ВУ к прострелу определяется путем их прострела штатными пулями стрелкового оружия, имеющими заостренную оживальную ГЧ. Помимо пуль, высокоскоростные КУ могут быть получены при взрыве кумулятивных снарядоформирующих зарядов [1, 2].

Необходимо отметить, что установлению механизмов и критериев возбуждения взрывных превращений в оболочечных ВУ при воздействии высокоскоростных ударников посвящена обширная литература, обзор которой дан в книге [3]. Вместе с тем остается малоизученным процесс возбуждения детонации в зарядах ВВ заостренными КУ.

В книге [3] приведен обобщенный энергетический критерий возбуждения детонации при интенсивном воздействии КУ. Этот критерий при воздействии КУ по нормали к поверхности ВУ имеет следующий вид:

$$G \geq G_{\text{кр}} \left(1 + m \frac{\delta_1}{d}\right)^2 (1 + \kappa)^2 \left(\frac{Z_{\text{об}} + Z_{\text{КУ}}}{Z_{\text{КУ}}}\right)^2 \left(\frac{Z_{\text{об}} + Z_{\text{ВВ}}}{2Z_{\text{об}}}\right)^2, \quad (1)$$

где $G = v^2 d$ — энергетический параметр, определяющий иницирующую способность КУ диаметром d и движущегося со скоростью v ; $G_{\text{кр}}$ — критическое значение энергетического параметра, необходимое для иницирования детонации в открытом заряде ВВ; m — коэффициент, учитывающий экранирование заряда ВВ оболочкой; δ_1 — толщина передней стенки оболочки; κ — коэффициент, учитывающий влияние формы ГЧ ударника; $Z_{\text{об}}$, $Z_{\text{КУ}}$, $Z_{\text{ВВ}}$ — импедансы материалов оболочки, КУ и ВВ соответственно.

В энергетическом критерии (1) форма ГЧ ударника учитывается множителем $(1 + \kappa)^2$, при этом для ударника с плоским торцом $\kappa = 0$, а для ударника с полусферической ГЧ в [4] предлагается значение коэффициента формы принимать равным единице. В работе [5] на основании численного моделирования было уточнено значение κ для ударников с полусферической ГЧ; оно оказалось равным 0,45–0,5.

Информация о коэффициенте формы для КУ с конической ГЧ исчерпывается зависимостью, приведенной в книге Р. Ллойда [6],

$$\kappa = 1,77 - 0,00725 \cdot 2\alpha,$$

справедливой в диапазоне $70^\circ \leq 2\alpha \leq 160^\circ$.

В настоящей статье с помощью численного моделирования исследуется процесс возбуждения детонации как в открытых зарядах ВВ, так и заключенных в стальные оболочки при высокоскоростном воздействии компактных цилиндрических КУ с разными углами при вершине. Цель — определение критических скоростей КУ, при превышении которых в зарядах ВВ возбуждается детонация.

Постановка задачи. Для исследования было выбрано модельное оболочечное ВУ (рис. 1, а). Чтобы понять роль оболочки, исследовали также воздействие высокоскоростного КУ на заряд ВВ без оболочки (рис. 1, б). Материал оболочки и ударника — среднеуглеродистая сталь. В качестве снаряжения использовался один из наиболее распространенных литевых взрывчатых составов ТГ 40/60 — сплав ТНТ (40 %) и гексогена (60 %). Поскольку состав ТГ 40/60 аналогичен американскому составу В (composition В) [7], то оба сплава далее обозначаются как сост. В и между ними различия не делается.

Расчетная модель содержит следующие основные элементы: цилиндрический компактный КУ, ВВ, оболочку и окружающий воздух. Изучали высокоскоростное ударное воздействие на ВУ КУ диаметром 12 мм и углами при вершине 30, 45, 60 и 90° (рис. 2).

Численное моделирование было выполнено в программе LS-DYNA методом ALE-2D (Arbitrary Lagrange-Eulerian). Метод ALE применяется для моделирования задач физики быстропротекающих процессов в сплошных, в том числе и реагирующих средах. Верификация численных расчетов задач иницирования зарядов ВВ показывает, что этот метод дает результаты, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными [8, 9].

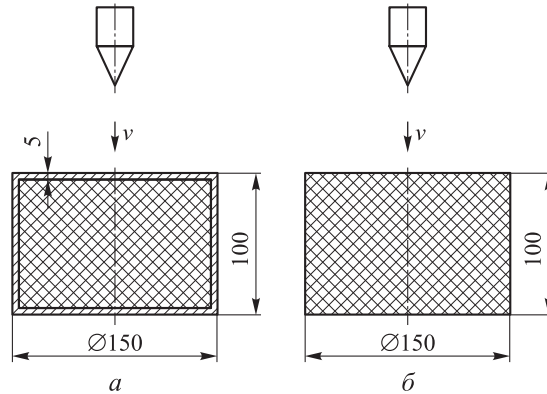


Рис. 1. Заряд ВВ в оболочке (а) и без (б)

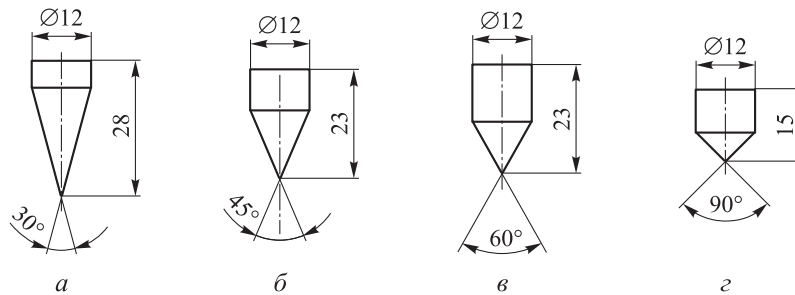


Рис. 2. Конструкция ударников:

а-г — $2\lambda = 30, 45, 60$ и 90° соответственно

В качестве уравнения состояния (УРС) как для ВВ, так и для продуктов детонации (ПД) использовалось УРС в форме JWL [1]:

$$p(V, e) = A \left(1 - \frac{\Gamma}{R_1 \frac{V}{V_0}} \right) \exp \left(-R_1 \frac{V}{V_0} \right) + B \left(1 - \frac{\Gamma}{R_2 \frac{V}{V_0}} \right) \exp \left(-R_2 \frac{V}{V_0} \right) + \frac{\Gamma e}{V}, \quad (1)$$

где p, e, V, V_0 — давление, полная энергия, удельный объем и начальный удельный объем в расчетной ячейке; Γ — коэффициент Грюнайзена; A, B, R_1, R_2 — эмпирические коэффициенты (табл. 1). Для описания кинетики разложения ВВ использовалась модель Ли — Тарвера [1, 3], в соответствии с которой скорость разложения ВВ описывается уравнением

$$\frac{d\lambda}{dt} = \begin{cases} I(1-\lambda)^b \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x, & \text{если } \frac{\rho}{\rho_0} > a+1 \text{ и } \lambda < \lambda_{ig\max}; \\ G_1(1-\lambda)^c \lambda^d p^y, & \text{если } \lambda < \lambda_{G1\max}; \\ G_2(1-\lambda)^e \lambda^g p^z, & \text{если } \lambda > \lambda_{G2\min}, \end{cases} \quad (2)$$

где λ — массовая доля ВВ; ρ, ρ_0 — плотность и начальная плотность в расчетной ячейке; p — давление в расчетной ячейке; $I, b, a, x, \lambda_{ig\max}, G_1, c, d, y, \lambda_{G1\max}, G_2, e, g, z, \lambda_{G2\min}$ — эмпирические коэффициенты, приведенные в табл. 2 для сост. В соответственно.

Таблица 1

Коэффициенты уравнения JWL

Сплав сост. В	А, ГПа	В, ГПа	R_1	R_2	Γ
	77810	-5,031	11,3	1,13	0,8938
ПД сост. В	А, ГПа	В, ГПа	R_1	R_2	Γ
	524,2	7,68	4,2	1,1	0,5

Таблица 2

Коэффициенты кинетики Ли — Тарвера для сплава сост. В

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

Эти уравнения состояния ВВ и ПД и модель кинетики, а также значения входящих в данные уравнения коэффициентов использовались ранее в работах [5, 10]. Полученные в этих работах результаты показали хорошее совпадение с известными экспериментальными данными. Моделировалось воздействие ударника по нормали к поверхности ВУ.

Результаты расчетов. В настоящей работе изучалось возбуждение детонации в зарядах ВВ только на начальной ударно-волновой стадии проникания КУ в ВУ. Эта стадия в расчетах условно ограничивалась временем 10...15 мкс. Наиболее подробно исследовали ударно-волновые процессы в зарядах ВВ при воздействии ударников со скоростью 2200 м/с.

Расчеты взаимодействия КУ с зарядом ВВ без оболочки показали, что с увеличением угла раствора КУ повышается давление, возникающее в ВВ при взаимодействии ударника с зарядом (рис. 3).

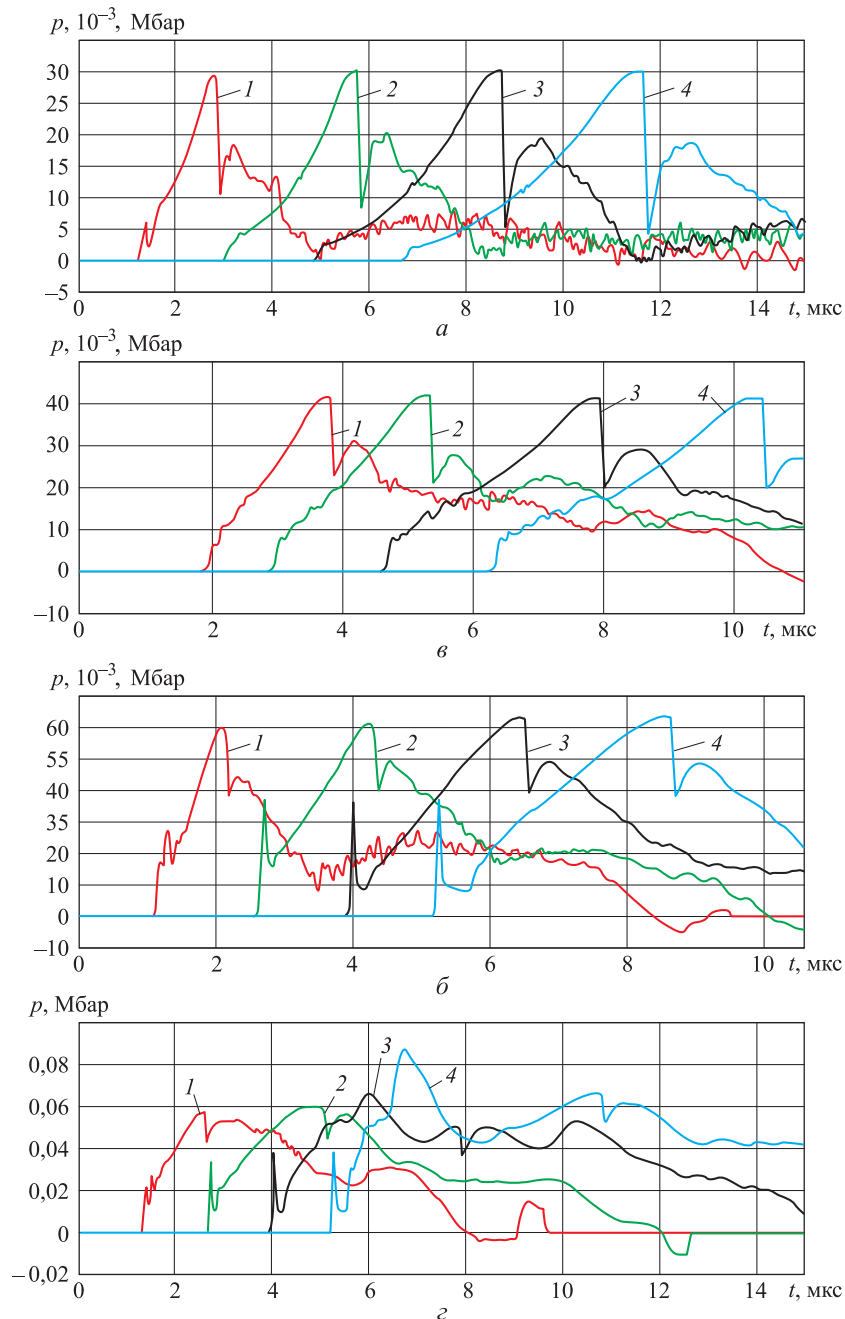


Рис. 3. Зависимости давления от времени при $v = 2200$ м/с, записанные датчиками, находящимися на оси симметрии заряда без оболочки на разном расстоянии от верхнего торца заряда (кривые 1–4 — 5, 10, 15 и 20 мм соответственно; а–г — см. рис. 2)

При анализе распределения полей давления (рис. 4, а, б) выявлено, что ВВ нагружается волной сжатия и давление в нем растет постепенно. В случае с малыми углами раствора КУ возбуждения детонации не происходит. При взаимодействии КУ с углом раствора $2\alpha = 90^\circ$ с ВВ возникает ударная волна и с некоторой

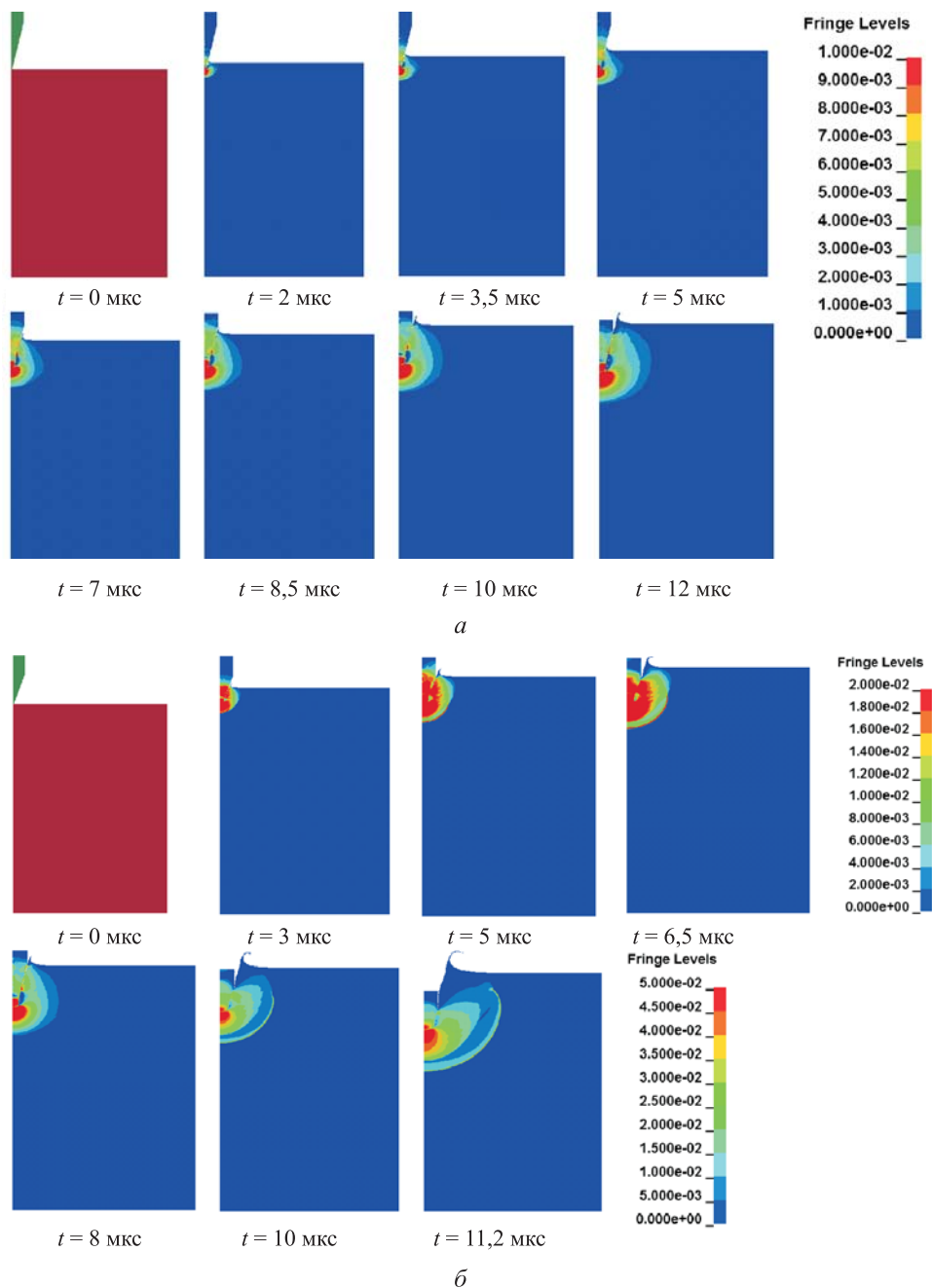


Рис. 4 (начало). Распределение поля давления в заряде ВВ без оболочки в разные моменты времени (а-б — см. рис. 2)

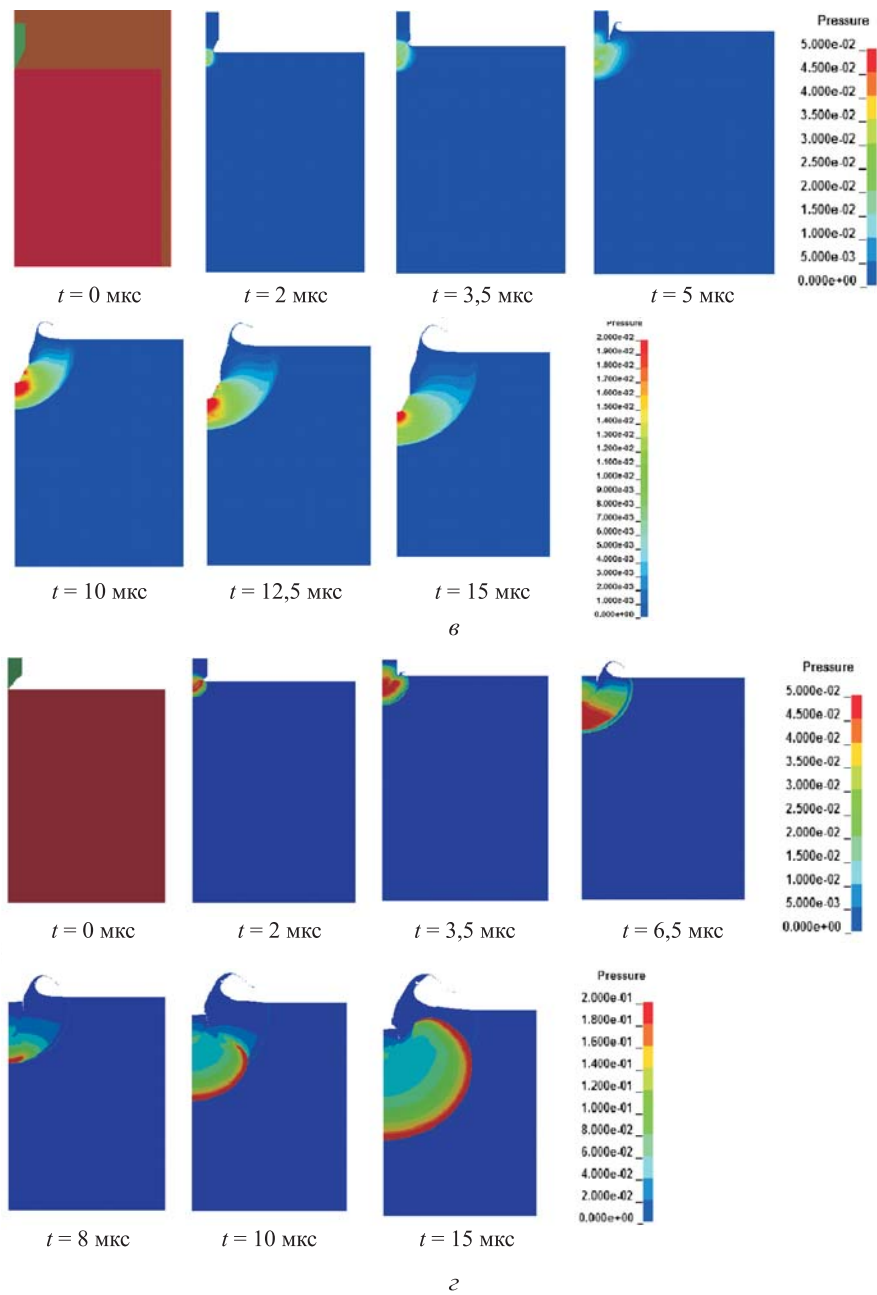


Рис. 4 (окончание). Распределение поля давления в заряде ВВ без оболочки в разные моменты времени (θ - z — см. рис. 2)

задержкой (рис. 4, θ) возбуждается детонация. Следует отметить зависимость времени нарастания давления от угла раствора конической части ударника — чем меньше угол раствора, тем больше время.

На рис. 5 приведено распределение скорости по длине ударника в момент начала внедрения его в заряд ВВ при воздействии КУ с углом при вершине 90° .

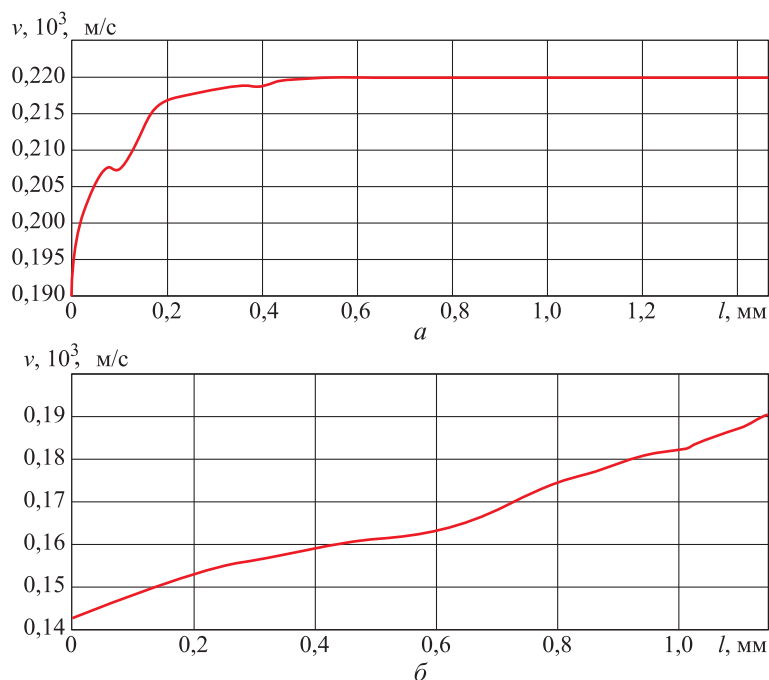


Рис. 5. Изменение по длине ударника скорости заряда без оболочки (а) и в оболочке (б)

Как следует из рис. 5, в случае взаимодействия КУ с зарядом ВВ в оболочке при ее пробитии существенно снижается скорость ударника. Из-за потери скорости давление нагружения в заряде ВВ меньше и время нарастания давления больше, чем при внедрении ударника в открытый заряд (рис. 6).

Отметим, что если для ударника с углом раствора конуса 30° (аналог пули) снижение давления незначительно и составляет менее 20 %, то в случае с ударником, у которого $2\alpha = 45^\circ$, уменьшение давления существенно — при взаимодействии его с зарядом ВВ в оболочке давление нагружения, возникающее в ВВ, почти в 3 раза меньше давления в заряде без оболочки. Тем не менее и в том и в другом случае возникающего давления недостаточно для возбуждения детонации.

При воздействии КУ с углом раствора 90° на заряд ВВ в оболочке возникающее давление меньше на ~ 20 %, чем в заряде ВВ без оболочки. Этого давления достаточно для инициирования детонации в ВВ. Вместе с тем следует отметить, что временная задержка возникновения детонации в заряде ВВ в оболочке существенно выше (рис. 7), чем в заряде ВВ без оболочки (12 мкс против 8 мкс).

Для определения критических скоростей инициирования детонации в оболочечных ВУ, снаряженных сост. В, при воздействии КУ диаметром 12 мм с различными углами раствора конической ГЧ были выполнены расчеты для разных скоростей ударников с шагом 100 м/с. За критическую скорость ударника принимали среднее значение между максимальной скоростью, при которой детонация

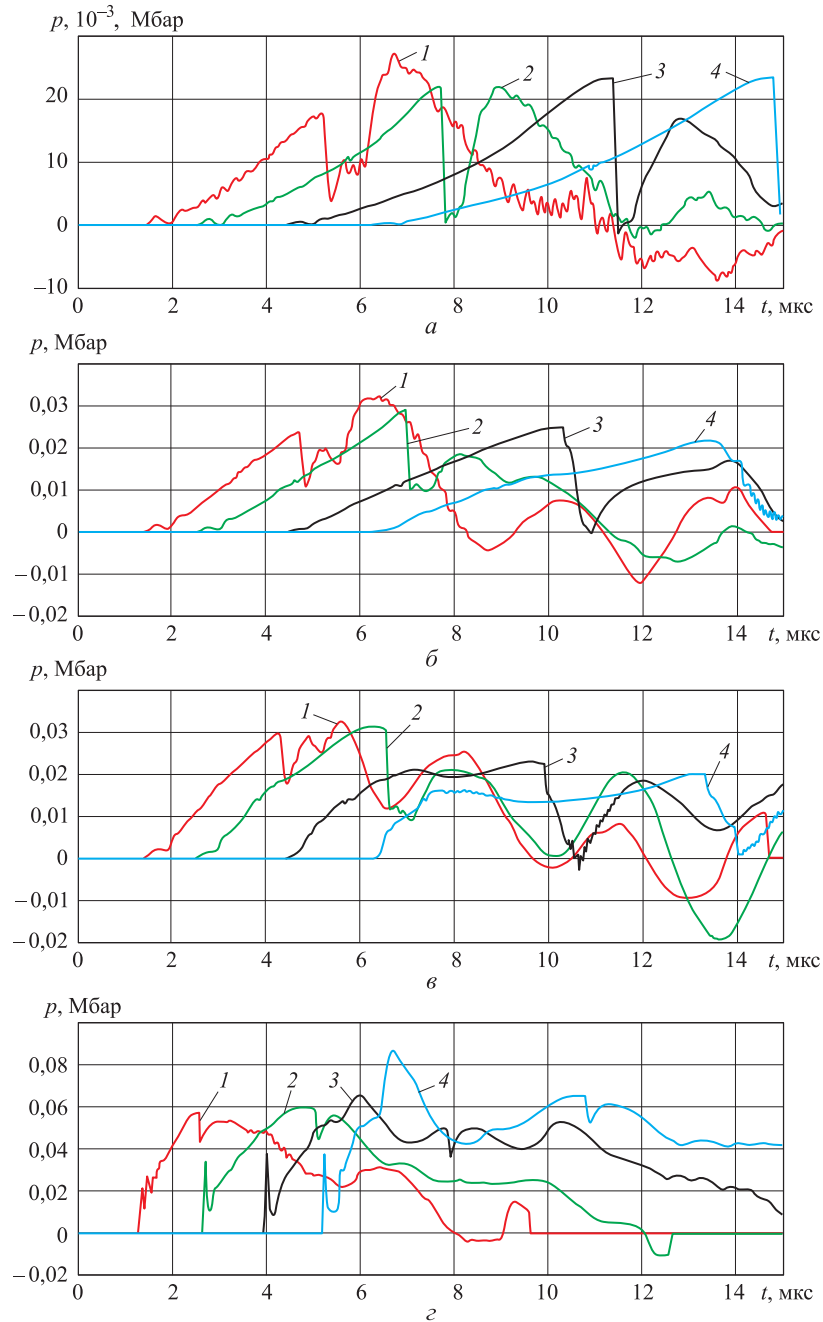


Рис. 6. Зависимости давления от времени при $v = 2200$ м/с на разных расстояниях от верхнего торца заряда (а-г и кривые 1-4 — см. рис. 3)

в первой ударной волне не инициируется, и минимальной, при которой происходит возбуждение детонации. Найдены следующие значения критической скорости инициирования детонации (± 50 — полуширина переходного интервала): $v_{кр} = 3350 \pm 50, 3000 \pm 50, 2400 \pm 50, 2100 \pm 50, 1450 \pm 50, 1350 \pm 50$ и 1300 ± 50 м/с при $2\alpha = 30, 45, 60, 90, 120, 150$ и 180° соответственно.

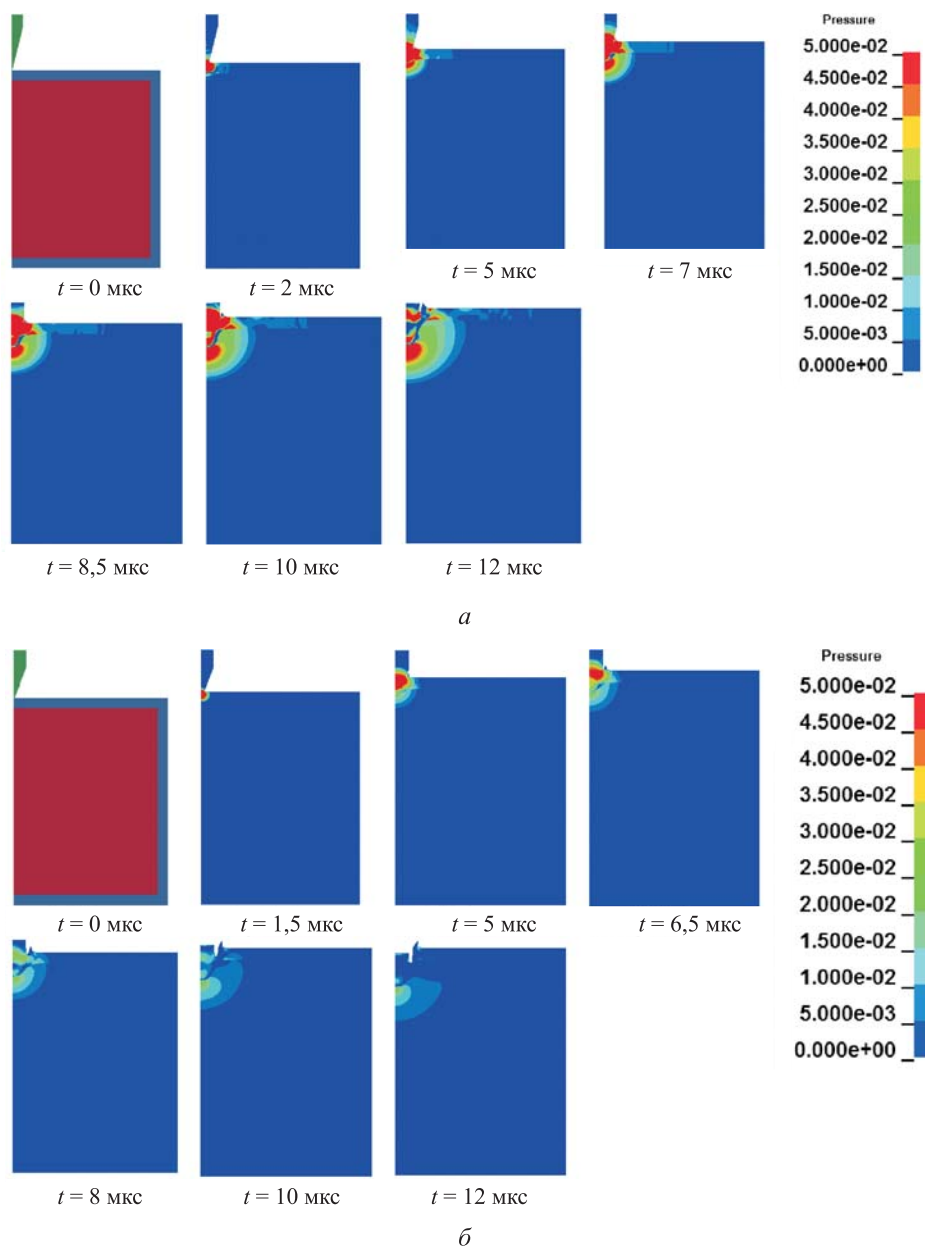


Рис. 7 (начало). Распределение поля давления в заряде ВВ в оболочке в разные моменты времени при $v = 2200$ м/с (а–б — см. рис. 2)

Например, запись $v_{кр} = 3000 \pm 50$ м/с следует понимать так: при скорости 3050 м/с происходит ударно-волновое иницирование детонации, при скорости 2950 м/с ударно-волнового иницирования детонации не происходит. Но это не означает, что заряд ВВ остается инертным. В нем возможно возбуждение взрывных процессов по другим механизмам.

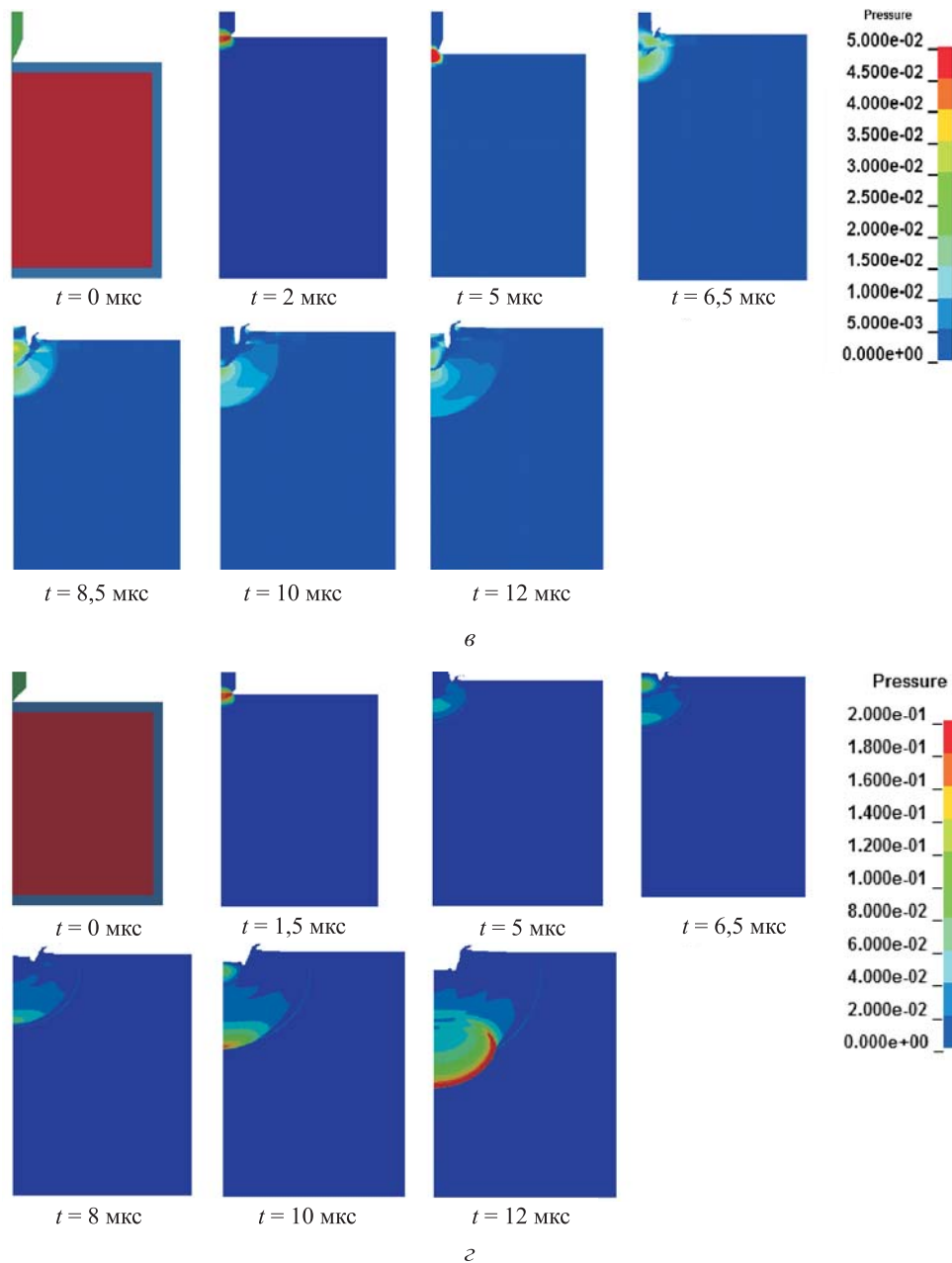
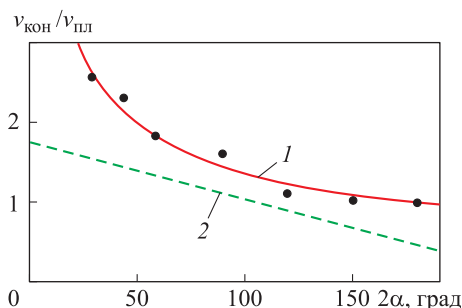


Рис. 7 (окончание). Распределение поля давления в заряде ВВ в оболочке разные моменты времени при $v = 2200$ м/с (α - z — см. рис. 2)

Полученные результаты позволили сравнить значения $v_{кр}$ со значением критической скорости инициирования при воздействии ударников с плоским торцом, а также построить зависимость отношения критической скорости инициирования ударника с коническим торцом к критической скорости инициирования ударника с плоским торцом от угла при вершине (рис. 8). Кроме того, на

рис. 8 приведено сравнение полученной зависимости для коэффициента формы ударников с конической ГЧ с зависимостью Р. Ллойда. Видно, что зависимость Р. Ллойда дает заниженные результаты.

Рис. 8. Зависимость отношений критических скоростей иницирования ударников с коническим и плоским торцами ($v_{\text{кон}}/v_{\text{пл}}$) от углов при вершине:
1 — полученная зависимость (3);
2 — зависимость Р. Ллойда



В результате аппроксимации данных, приведенных на рис. 8, получено соотношение для коэффициента КУ, которое справедливо для всего диапазона значений углов:

$$k = 16,6 \cdot 2\alpha^{-0,54} \quad (3)$$

(2α в градусах). Как следует из рис. 8, полученная зависимость удовлетворительно согласуется с результатами расчета.

Исходя из проведенных расчетов, можно выделить два типа взаимодействия КУ с конической ГЧ с зарядами ВВ. Ударники, имеющие угол раствора конуса меньше некоторого критического, проникают в заряд по безударному механизму, порождая в нем волны сжатия с давлением, недостаточным для возбуждения детонации. В то время как проникание ударника с $\alpha_{\text{кр}} < \alpha < 90^\circ$ осуществляется по механизму ударно-волнового нагружения, вследствие чего в заряде ВВ возникает ударная волна, приводящая к иницированию детонации. В результате проведенных расчетов при $v_{\text{кр}} = 2200$ м/с получено, что критический угол $\alpha_{\text{кр}} = 40^\circ \dots 50^\circ$.

Подводя итог, следует сказать, что ударники с конической ГЧ имеют невысокую иницирующую способность. Такие ударники могут возбуждать детонацию в заряде ВВ при скоростях более 2000 м/с. На практике получение таких скоростей сложно и реализуемо только на специальных стендах.

Выводы. 1. С использованием программы ANSYS LS-DYNA выполнено численное моделирование взаимодействия КУ с конической ГЧ с разными углами раствора с оболочечными ВУ, снаряженными сост. В.

2. Определены критические скорости возбуждения детонации при воздействии КУ с углами при вершине 30, 45, 60 и 90° при взаимодействии с зарядами ВВ в оболочке толщиной 5 мм и значение коэффициента формы для ударников с конической ГЧ $k = 16,6 \cdot 2\alpha^{-0,54}$.

3. Показано, что ударники с острой конической ГЧ обладают меньшей иницирующей способностью вследствие того, что их воздействие приводит к образованию в ВВ волн сжатия с плавным профилем нарастания давления.

4. Показано, что наличие оболочки затрудняет инициирование заряда ВВ вследствие значительного снижения скорости ударника при ее пробитии и уменьшения крутизны профиля нагружающей ВВ волны сжатия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орленко Л.П., ред. Физика взрыва. В 2 т. Т. 1. М.: Физматлит, 2004. 823 с.
2. Оценка рациональной формы сверхдлинных поражающих элементов снарядоформирующих зарядов / В.И. Колпаков, В.Д. Баскаков, В.Т. Калугин, Н.В. Шикунев, А.С. Софьин // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2012. № 71. С. 70–74.
3. Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. Возбуждение и распространение взрывных превращений в зарядах взрывчатых веществ. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 354 с.
4. Bahl K.L., Vantine H.C., Weingart R.C. The shock initiation of bare and covered explosive by projectile impact // The 7th Symp. (Intern.) on Detonation. Annapolis (Maryland, USA), 1981. P. 358–368.
5. Кобылкин И.Ф., Павлова И.А. Возбуждение детонации в снаряжении оболочечных взрывных устройств при воздействии ударников с разной формой головной части // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 3. С. 54–65.
DOI: 10.18698/0236-3941-2017-3-54-65
6. Lloyd R.M. Physics of direct hit and near miss warhead technology / Ser. Progress in astronautics and aeronautics. Vol. 194. AIAA, 2001. 416 p.
7. Dobratz B.M., Crawford P.C. Properties of chemical explosives and explosive simulants. University of California, Livermore, LLNL, 1985.
8. McClenman S., Ripley R.C., Pelletier P. The effect of bullet design on insensitive munitions bullet impact test results // 27th Int. Symp. on Ballistics. Freiburg, Germany, 2013. P. 1656–1667.
9. Laurence W., Starkenberg J., Krzewinski B. Secondary effect on projectile-impact shock initiation // 13th Int. Symp. on Detonation, 2006. P. 0822–0830.
10. 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. № 3.
DOI: 10.18698/2308-6033-2015-3-1377
URL: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mlgp/1377.html>

Кобылкин Иван Федорович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Павлова Ирина Александровна — аспирантка кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кобылкин И.Ф., Павлова И.А. Инициирование детонации в зарядах взрывчатых веществ высокоскоростными ударниками с конической головной частью // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 6. С. 4–18.
DOI: 10.18698/0236-3941-2017-6-4-18

INITIATION OF HIGH EXPLOSIVE CHARGES BY HIGH SPEED COMPACT PROJECTILES WITH CONICAL HEAD PART

I.F. Kobylkin
I.A. Pavlova

kobylkin_ivan@mail.ru
i.a.yakovenko@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article describes the results of numerical simulation of interaction between compact projectiles having a conical head part with different expansion angles and explosives cased in steel shells with the thickness of 5 mm and equipped with composition B. We determined the critical shock initiation velocities under the action of the projectile having the conical shape of the head part with the corners at the apex of 30, 45, 60, and 90° when interacting with explosive charges in a 5 mm thick shell and the value of the form factor for the projectiles with a conical head part. Findings of the research show that compact projectiles with a conical head part have less initiation capability, as their influence results in the formation of the compressive waves with a smooth pressure rise profile

Keywords

Charge, high explosive, casing, shock initiation, shock wave, numerical simulation, decomposition kinetics

Received 02.12.2016
© BMSTU, 2017

REFERENCES

- [1] Orlenko L.P., red. Fizika vzryva. V 2 t. T. 1 [Physics of explosion. In 2 vols. Vol. 1]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 823 p.
- [2] Kolpakov V.I., Baskakov V.D., Kalugin V.T., Shikunov N.V., Sofin A.S. Rational shape assessment of super-extended destructive agents of explosively formed projectile. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk.*, 2012, no. 71, pp. 70–74 (in Russ.).
- [3] Kobylkin I.F., Selivanov V.V. Vozbuzhdenie i rasprostranenie vzryvnykh prevrashcheniy v zaryadakh vzryvchatykh veshchestv [Excitation and expansion of explosive transformation in explosive charges]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2015. 354 p.
- [4] Bahl K.L., Vantine H.C., Weingart R.C. The shock initiation of bare and covered explosive by projectile impact. *The 7th Symp. (Intern.) on Detonation*. Annapolis (Maryland, USA), 1981. Pp. 358–368.
- [5] Kobylkin I.F., Pavlova I.A. Shock initiation of cased explosives by a high-speed striker with warhead of different forms. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2017, no. 3, pp. 54–65 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2017-3-54-65
- [6] Lloyd R.M. Physics of direct hit and near miss warhead technology. Ser. Progress in astronautics and aeronautics. Vol. 194. AIAA, 2001. 416 p.
- [7] Dobratz B.M., Crawford P.C. Properties of chemical explosives and explosive simulants. University of California, Livermore, LLNL, 1985.
- [8] McClennan S., Ripley R.C., Pelletier P. The effect of bullet design on insensitive munitions bullet impact test results. *27th Int. Symp. on Ballistics*. Freiburg, Germany, 2013. Pp. 1656–1667.

[9] Laurence W., Starkenberg J., Krzewinski B. Secondary effect on projectile-impact shock initiation. *13th Int. Symp. on Detonation*, 2006. Pp. 0822–0830.

[10] Kobylykin I.F., Petyukov A.V., Yakovenko I.A. The projectile impact initiation of the cased high explosive charges. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2015, no. 3 (in Russ.). DOI: 10.18698/2308-6033-2015-3-1377

Available at: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mlgp/1377.html>

Kobylykin I.F. — Dr. Sc. (Eng.), Professor of High Precision Aircraft Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Pavlova I.A. — post-graduate student of High Precision Aircraft Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kobylykin I.F., Pavlova I.A. Initiation of High Explosive Charges by High Speed Compact Projectiles with Conical Head Part. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2017, no. 6, pp. 4–18. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-6-4-18