

Математическое моделирование формирования компактных ударников из низкосферических облицовок

© В.И. Колпаков,¹ Г.Г. Савенков,² К.А. Рудомёткин,³ А.Ю. Григорьев⁴

¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005 Москва, Россия

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 19013 Санкт-Петербург, Россия

³ Открытое акционерное общество „Водтрансприбор“, 197342 Санкт-Петербург, Россия

⁴ Экспертно-криминалистический центр ГУ МВД по Санкт-Петербургу и Ленинградской области, 198097 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: sav-georgij@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 30 июня 2015 г.)

Рассмотрена физико-математическая постановка задачи взрывного формирования ударного ядра из медной низкосферической облицовки. Проведены расчеты формирования ядра для заряда из флегматизированного гексогена для двух моделей поведения материала облицовки — меди и их сравнение с результатами эксперимента.

Введение

Развитие и совершенствование вычислительных систем открывают новые возможности для моделирования различных высокоэнергетических и высокоскоростных процессов, для аккуратного описания которых необходимо, кроме подробного пространственно-временного разрешения и адекватной математической модели верифицированных данных: параметров и характеристик описываемых процессов и применяемой модели. Даже отбросив проблему пространственно-пространственного разрешения (что естественно снижает качество получаемых результатов, поскольку для указанных быстропротекающих процессов время и масштабы пространства могут быть определяющими), мы получим не менее острую проблему верификации данных, которая на сегодняшний день является открытой. Связано это с тем, что эти данные получают либо с помощью экспериментов, которые в лучшем случае совпадают с описываемыми процессами по некоторым параметрам (например, скорость деформации, интенсивность импульса давления, скорость соударения и т.д.). В худшем же случае эти данные берутся из обычных квазистатических экспериментов с некими поправками на динамичность процесса или исходя из опыта расчетчиков.

Тем не менее получаемые результаты численного моделирования позволяют получать априорную оценку возможностей той или иной конструкции, работа которой связана с высокоэнергетическими процессами, с точки зрения ее эффективности, работоспособности или живучести. Однако для подтверждения достоверности (верификации) получаемых результатов желательно производить сравнение численного расчета какого-либо достаточно простого изделия, работающего в условиях, присущих более сложным дорогостоящим системам.

Требование простоты изделия в первую очередь связана с экономичностью постановки и проведения валидационных экспериментов. После проведения тестовых валидационных экспериментов и сравнения их с расчетными результатами, параметры и характеристики расчетного процесса, если он адекватно описывает физический процесс, а получаемые результаты удовлетворяют требуемой точности, можно подставлять в расчеты конструкции более высокого ранга.

Для такого подхода в рамках задачи общего проектирования кумулятивных боеприпасов вполне годится численное моделирование процесса формирования ударного ядра и дальнейшего (при необходимости) пробития им преграды конечной толщины в так называемых разрушителях, которые с успехом применяются при обезвреживании взрывоопасных предметов и артиллерийских боеприпасов [1,2].

Разрушители подобного типа относятся к кумулятивным зарядам с металлическими облицовками малого прогиба (иначе называемые низкосферическими облицовками [3]) — так называемым снарядоформирующим зарядам (СФЗ). В настоящей работе приводятся результаты численного моделирования указанных процессов применительно к конструкции разрушителя (рис. 1) диаметром 40 mm, имеющего низкосферическую оболочку из меди марки М1 толщиной 1.5 mm.

Постановка задачи

Функционирование СФЗ обычно разбивают на три этапа [3]. На этапе формирования происходит взрывное нагружение кумулятивной облицовки (КО) и ее последующее ускорение под действием продуктов детонации (ПД). На завершающей стадии данного первого этапа инерционное деформирование облицовки,

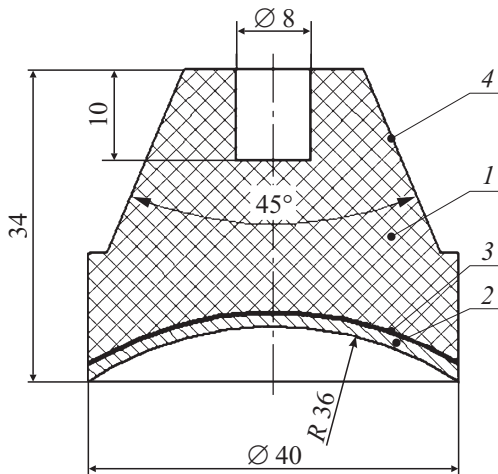


Рис. 1. Разрушитель Р-40: 1 — заряд ВВ, 2 — облицовка из меди марки М1, 3 — лак битумный, 4 — лак шеллачный.

сопровождается диссипацией энергии за счет работы деформации, приводит к образованию безградиентного компактного, удлиненного или же фрагментированного поражающего элемента (ПЭ), называемого также „ударным ядром“ [3]. Второй этап — движение ударного ядра к преграде. Наконец, третий этап — взаимодействие ударного ядра с преградой.

При численном моделировании ударных и взрывных явлений наиболее часто используются модели упруго-пластической и идеальной упругопластической сред с учетом их прочности и сжимаемости. Все модели базируются на фундаментальных законах сохранения массы, импульса и энергии, включают в себя кинематические и физические соотношения.

При этом задачи высокоскоростного деформирования, связанные с распространением волн по твердой среде (ударных волн, волн разрежения, волн напряжений), как правило, рассматриваются в адиабатическом приближении, т.е. достаточно медленные процессы теплообмена частиц среды между собой не учитываются. Кроме того, при рассмотрении подобных процессов, связанных с возникновением интенсивных полей напряжений, также, как правило, пренебрегают действием внешних объемных сил типа сил тяжести.

В целом система исходных уравнений, описывающих поведение упругопластической среды, имела в настоящей следующий вид

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla_i v^i = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = \nabla_j \sigma_i^j, \quad (2)$$

$$\rho \frac{de}{dt} = \sigma^{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}, \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (\nabla_i v_j + \nabla_j v_i), \quad (4)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^{(e)} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{(p)}, \quad (5)$$

$$\frac{D D \sigma_{ij}}{Dt} = 2G(\dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon} g_{ij}) = 2G \left(\dot{\varepsilon}_{ij} + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt} g_{ij} \right),$$

$$\dot{\varepsilon} = -\frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt}, \quad (6)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{(p)} = \lambda D \sigma_{ij}, \quad (7)$$

$$p = p(\rho, e), \quad (8)$$

$$\sigma_{ij} = -p g_{ij} + D \sigma_{ij}, \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{3}{2Y^2} \frac{dA_p}{dt} \delta \left(\frac{dA_p}{dt} \right), \quad \delta = \begin{cases} 1, & dA_p/dt \geq 0 \\ 0, & dA_p/dt < 0, \end{cases}$$

$$dA_p = \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^{(p)}. \quad (10)$$

Здесь t — текущее время, ρ — плотность, p — давление, e — удельная внутренняя энергия, v_i — компоненты вектора массовой скорости среды, g_{ij} — метрические коэффициенты основного базиса выбранной системы координат ($i, j = x, y, z$ или $i, j = x, \theta, y$ и $i, j = r, \theta, z$, или $i, j = x, y$ и $i, j = r, z$), причем $g_{ij} = 1$ при $i = j$ и $g_{ij} = 0$ при $i \neq j$; σ_{ij} — компоненты тензора напряжений, $D \sigma_{ij}$ — компоненты девиатора напряжений. Далее $\dot{\varepsilon}_{ij}$, $\dot{\varepsilon}_{ij}^{(e)}$, $\dot{\varepsilon}_{ij}^{(p)}$ — соответственно компоненты тензора скоростей деформаций, его упругая и пластическая составляющие, $\dot{\varepsilon}$ — средняя скорость деформаций, $D(\dots)/Dt$ — производная Яуманна, G — модуль сдвига, Y — динамический предел текучести среды. Величина A_p — работа пластической деформации $\varepsilon_{ij}^{(p)}$, причем $dA_p/dt = \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^{(p)}$; λ — скалярный множитель, определяемый удельной мощностью пластической деформации. В приведенной системе уравнений в порядке следования представлены законы сохранения массы (1), импульса (2) и энергии (3), кинематические соотношения (4). Соотношения (5)–(7) в совокупности представляют собой уравнения пластического течения Прандтля–Рейсса. Соотношение (8) — уравнения состояния взаимодействующих сред, представленные в общем виде. Соотношение (9) — взаимосвязь компонент тензора полных напряжений с шаровой и девиаторной составляющими. Уравнение (10) — условие пластического течения.

Программа расчета, свойства материалов облицовки и преград

Расчеты проводились в двумерной осесимметричной постановке с использованием эйлера и совместного эйлера-лагранжева (СЭЛ) [4] конечно-разностных алгоритмов. Анализировались динамика взрывного формирования поражающего элемента (ударного ядра) заряда, представленного на рис. 1. В качестве взрывчатого вещества (ВВ) заряда использовался флегматизированный гексоген (плотность — $\rho_{ex} = 1.65 \text{ g/cm}^3$, скорость

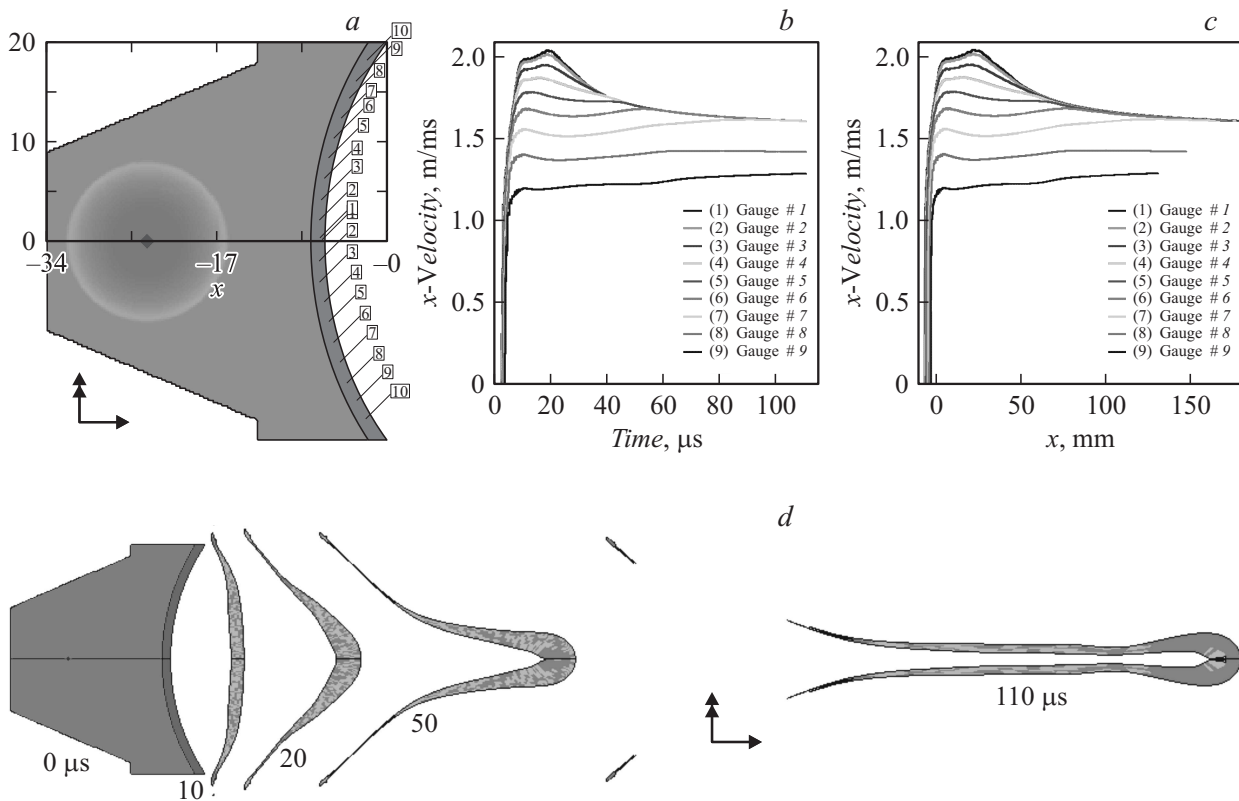


Рис. 2. Расчетная схема (a), изменение скорости точек облицовки (b) и (c) и динамика развития формирования ударного ядра по модели 3–А (d).

Таблица 1. Параметры уравнения состояния JWL для флегматизированного гексогена

Параметры	Значения	
	max	min
A_{ex}, GPa	1200	1168
B_{ex}, GPa	44.9	43.6
r_1	5.91	5.92
r_2	1.82	1.83
ω_{ex}	0.32	0.32
k	3.0	3.0
$e_0, \text{GJ/m}^3$	8.64	7.71

Таблица 2. Характеристики материала облицовки меди марки М1

$\rho_0,$	$G,$	$Y,$	σ_p	ψ	Источник
g/cm^3	GPa	GPa	GPa	$\%$	
8.9	45.5	0.3	1.0	75	[4–7]

детонации — $D = 8.1 \text{ km/s}$, удельная теплота взрывчатого превращения — $Q = 5.23 \text{ MJ/kg}$, давление в точке Чепмена–Жуге — $p_{CJ} = 27.06 \text{ GPa}$.

Для описания поведения взаимодействующих материалов использовалась идеальная упругопластическая модель среды [5], реализуемая в программном комплексе AUTODYN. В качестве уравнений состояния для всех рассматриваемых инертных материалов за исключением воздуха использовались баротропные зависимости вида

$$p = K_0[(\rho/\rho_0) - 1],$$

где ρ_0 — начальная плотность среды, K_0 — модуль объемного сжатия, p — давление.

Для описания ПД использовалось уравнение состояния в форме Джонсона–Уилкинса–Ли (JWL)

$$p = p_{JWL} = A_{ex} \left(1 - \frac{\omega_{ex}}{r_1 V} \right) \exp(-r_1 V) + B_{ex} \left(1 - \frac{\omega_{BB}}{r_2 V} \right) \exp(-r_2 V) + \frac{\omega_{ex}}{V} e,$$

где $V = \rho_{ex}/\rho$ относительный удельный объем, e — удельная внутренняя энергия ВВ, причем $e_0 = \rho_{ex} \cdot Q$, $A_{ex}, B_{ex}, r_1, r_2, \omega_{ex}$ — эмпирические коэффициенты, численные значения которых для отечественных ВВ, как правило, не известны, поэтому все коэффициенты для этого уравнения состояния рассчитывались по методике, изложенной в [6]. Расчетные значения указанных коэффициентов приведены в табл. 1, значения характеристик материалов преград и облицовки приведены в табл. 2.

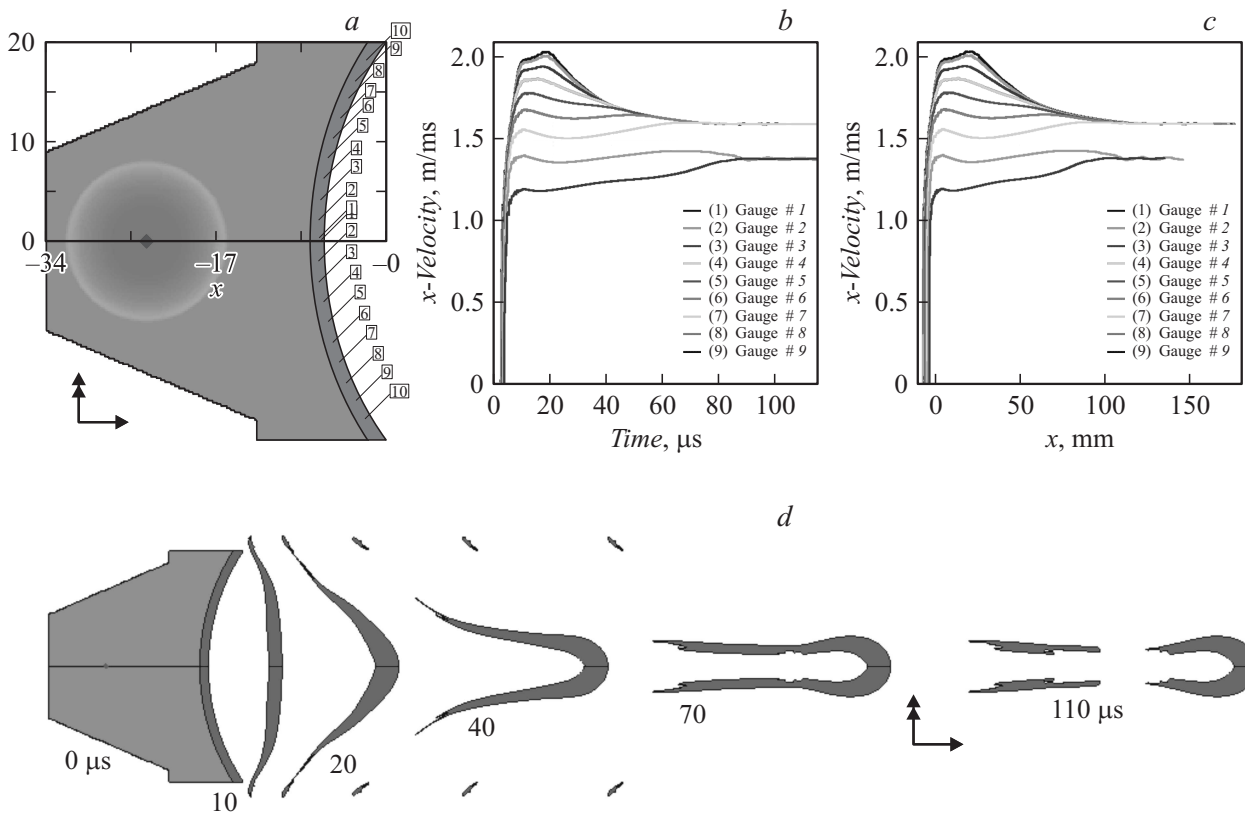


Рис. 3. Расчетная схема (а), изменение скорости точек облицовки (b) и (c) и динамика развития формирования ударного ядра по модели Д–К (d).

Описание поведения металла облицовки — меди М1 проводилось по двум моделям:

1) по модели Зерелли–Амстронга (Zerilli–Amstrong), согласно которой динамический предел текучести определяется уравнением вида $Y = Y_0 + C_1 \exp[-C_3 T + C_4 T \lg(\dot{\epsilon}_i)] + C_5 \epsilon_i^{(n)}$, где $\epsilon_i, \dot{\epsilon}_i$ — соответственно интенсивности деформаций и скоростей деформаций, T — текущая температура среды, Y_0, C_1, C_3, C_4, C_5 и n — постоянные, определяемые из условия описания опытных данных: $Y_0 = 0.065$ GPa, $C_1 = 0.89$ GPa, $C_3 = 0.0028$, $C_4 = 0.000115$, $C_5 = n = 0$;

2) по модели Джонсона–Кука: $Y = (A + B \epsilon_p^n)(1 + C \ln(\dot{\epsilon}_p))(1 - T_*^m)$. Здесь $A = 0.09$ GPa, $B = 0.292$ GPa, $C = 0.025$, $n = 0.31$, $T = 1356$ K, $m = 1.09$.

Для описания разрушения металлических элементов конструкции заряда и преграды под действием ПД или в процессе проникания использовалась комбинация критериев откольной прочности $\sigma_i = \sigma_P$ (σ_i — интенсивность напряжений, σ_P — откольная прочность) и предельных пластических деформаций $\epsilon_i = \epsilon_P$ (ϵ_i — интенсивность деформаций, $\epsilon_P = 2 \cdot \ln\left(\frac{1}{1-\psi}\right)$ — предельная пластическая деформация согласно критерию Смирнова–Аляева [6]). Для меди М1 принималось $\psi = 0.75$, в этом случае предельная деформация $\epsilon_P = 2.77$.

Результаты математического моделирования. Сравнение с экспериментом

Цель численного моделирования состояла в определении потенциальных возможностей программы расчета формирования ударного ядра, а также в верификации данных и параметров, входящих в модель и программу.

На рис. 2 представлены комплексные результаты расчетов по формированию ударного ядра на основе модели Зерелли–Амстронга (З–А), на рис. 3 аналогичные результаты на основе модели Джонсона–Кука (Д–К), которые и будут обсуждаться ниже.

С точки зрения кинематических параметров (скорости элементов облицовки и значение общей скорости сформировавшегося ядра) обе модели дают практически одинаковые результаты. Скорость ядра по обоим моделям около 1750 m/s, в случае модели З–А такое значение достигается через 80 μ s на дальности полета ~ 130 mm, а в случае модели Д–К — через 60 μ s на расстоянии 100 mm.

Отличия наблюдаются в форме ядра и его целостности на траектории. Как следует из результатов расчета, ядро по модели З–А сохраняет свою целостность гораздо больше времени по сравнению с ядром, рассчитанным по модели Д–К (рис. 2, 3).

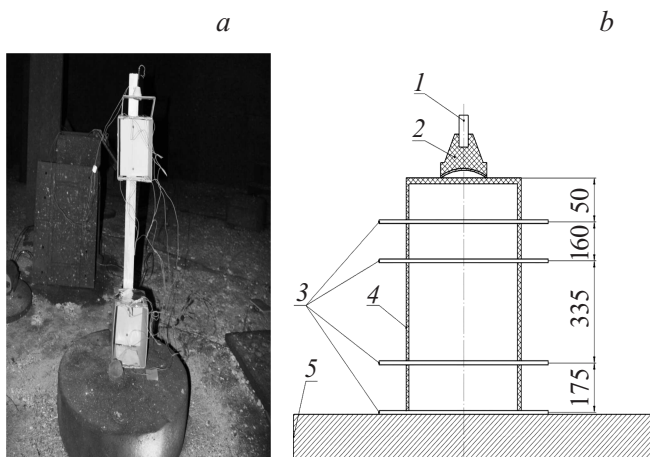


Рис. 4. Вид экспериментальной установки (а) и схема эксперимента (b): 1 — ЭД, 2 — Р-40, 3 — система электроконтактных датчиков, 4 — стойка, 5 — отбойник.

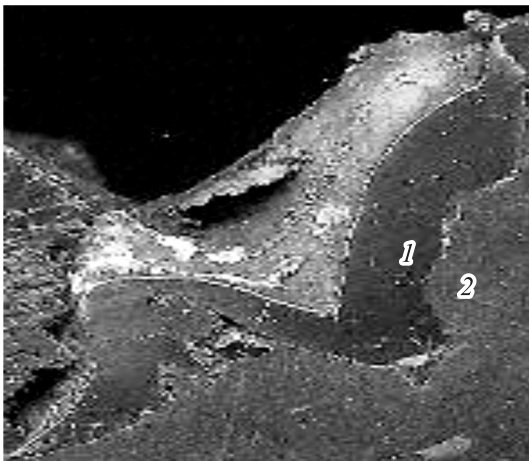


Рис. 5. Уловленное ударное ядро: 1 — тело ядра, 2 — формовочная паста для изготовления шлифа.

Проведенные с помощью электроконтактного метода эксперименты по определению скорости ядра на базе измерения 165 mm (вид экспериментальной установки и схема проведения опыта приведены на рис. 4) показали, что средняя скорость ядра разрушителя Р-40 составляет ~ 1800 m/s, т.е. полученное расчетное значение скорости (1750 m/s) близко к экспериментальному.

Кроме того, были проведены эксперименты по улавливанию ядра в песчаную преграду на различных дистанциях. Вид ядра, уловленного на дистанции ~ 175 mm, представлен на рис. 5. Как видно из рисунка, форма уловленного ядра ближе к форме, полученной расчетом по модели З–А.

Таким образом, в заключение по результатам расчетов и сравнения их с имеющимися экспериментальными данными можно сделать следующие выводы.

1. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов показало достаточно хорошее совпадение независимо от используемой модели поведения материала облицовки.

2. Различные физико-математические модели описания материала облицовки практически не сказывались на расчетных кинематических характеристиках ее движения.

3. Принятые расчетные характеристики флегматизированного гексогена позволяют адекватно описывать формирование ударного ядра в рамках разработанного алгоритма и программы расчета.

4. Разрушение и форму ударного ядра более адекватно описывает модель материала З–А.

Список литературы

- [1] Григорьев А.Ю., Мазур А.С., Семашкин Г.В. и др. // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2011. Вып. 5–6. С. 54–57.
- [2] Васильев В.Д., Григорьев А.Ю., Дунилов К.К. и др. Патент РФ № 2500980.
- [3] Физика взрыва. Т. 2 / Под ред. Л.П. Орленко. М.: Физматлит, 2002. 656 с.
- [4] Колпаков В.И., Савенков Г.Г., Мазур А.С. и др. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 1. С. 3–9.
- [5] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. Численные методы в задачах быстропротекающих процессов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 520 с.
- [6] Бойко М.М., Грязнов Е.Ф., Давыдов Ю.В., Колпаков В.И. и др. // IX Харитоновские тематические научные чтения 12–16 марта 2007 г. Саров. Тр. междунар. конф. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2007. С. 507–512.
- [7] Селиванов В.В. Механика разрушения деформируемого тела. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 420 с.