

ВОЗМОЖНОСТЬ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СНАРЯДОФОРМИРУЮЩИХ ЗАРЯДОВ С АЛЮМИНИЗИРОВАННЫМИ ВЗРЫВЧАТЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОТОТИПОВ БОЕПРИПАСОВ

С.Г. Андреев¹, М.М. Бойко¹, В.Ю. Клименко²

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

e-mail: sm4-2009@mail.ru

²Институт химической физики РАН им. Н.Н. Семенова, Москва, Россия

e-mail: klimenko@center_chph.ras.ru

Рассмотрены полуэмпирические методы разработки прототипов снарядоформирующих зарядов (СФЗ) типа SADARM. Показаны ограниченные возможности этих методов в тех случаях, при которых в целях улучшения соотношения мощности действия и стойкости боеприпаса к поражающим воздействиям используются разрывные заряды из алюминизированных взрывчатых веществ. Предложено уравнение состояния продуктов детонации с учетом кинетики окисления алюминиевых добавок, адаптированное к использованию при компьютерном моделировании функционирования СФЗ. Приведены примеры результатов расчетов, показывающие возможность улучшения функциональных характеристик СФЗ путем замены традиционных высокобризантных ВВ на низкопористые алюминизированные взрывчатые составы с пониженной ударно-волновой чувствительностью.

Keywords: компьютерное моделирование, снарядоформирующий заряд, продукты детонации, алюминизированные взрывчатые вещества, кумулятивная облицовка, деформация.

POSSIBILITY OF COMPUTER SIMULATION OF FUNCTIONING OF THE SHELL-FORMING CHARGES WITH ALUMINIZED EXPLOSIVES WHEN DEVELOPING PROTOTYPES OF AMMUNITION

S.G. Andreev¹, M.M. Boiko¹, V.Yu. Klimenko²

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: sm4-2009@mail.ru

²ООО "NPP "Vysokie Davleniya", Institute of Chemical Physics, RAS,

Moscow, Russia

e-mail: klimenko@center_chph.ras.ru

Semi-empirical methods for developing prototypes of shell-forming charges of the SADARM type are considered. Limited possibilities of these methods are shown for the cases, when in order to improve a ratio of the power of action to the ammunition resistance against striking effect, the explosive charges made of the aluminized explosives are used. The equation of state of detonation products taking into account kinetics of oxidation of the aluminum additives is offered, which is adapted for using in computer simulation of functioning of shell-forming charges. Examples of results of calculations are given, which demonstrate the possibility to improve functional characteristics of shell-forming charges by replacing traditional high-brisance explosives by low-porosity aluminized explosives with the lower shock-wave sensitivity.

Keywords: computer simulation, shell-forming charge, detonation products, aluminized explosives, cumulative lining, deformation.

Средства поражения с использованием ударного ядра, или устройства со снарядоформирующими (СФЗ) зарядами являются разновидно-

стью кумулятивных боеприпасов (БП), отличающихся возможностью взрывного формирования дальнобойных поражающих элементов (ПЭ) и точного их прицеливания.

Сущность достижения высокой эффективности действия таких БП образно выражается аббревиатурой SADARM (Sense and Destroy Armor — обнаружь и уничтожь бронецель) [1], которую мы будем использовать в дальнейшем.

Основным элементом БП типа SADARM, рассматриваемым в настоящей статье, является его СФЗ, который в первом приближении считается состоящим из разрывного заряда (РЗ), по которому распространяется детонация в нормальном установившемся режиме, кумулятивной облицовки (КО), того же наружного диаметра (d_3), что и РЗ, и корпуса (однородного материала, чаще — металла) (рис. 1).

В функционировании СФЗ, представляющем собой сложный процесс, выделяют [1] четыре характерных этапа: 1) взрывное нагружение КО и ее ускорение под действием продуктов детонации РЗ; 2) инерционное деформирование облицовки, приводящее к образованию так называемого безградиентного ПЭ, т.е. окончательно сформированного; 3) движение сформированного элемента к поражаемой преграде, при котором материал ПЭ подвергается только аэродинамическим воздействиям с давлениями на один–два порядка меньшими по сравнению с 1-й и 2-й стадиями; 4) взаимодействие ПЭ с преградой.

Сложность процессов, протекающих на каждом этапе, и их взаимосвязь, в конечном счете обуславливающая возможность требуемого результата срабатывания СФЗ, является причиной того, что до настоящего времени не существовало надежных методов расчета функционирования СФЗ, позволяющих проводить разработку конструкции БП типа SADARM, хотя существуют циклы работ отдельных авторов, позволяющие достаточно близко подойти к решению этой важной проблемы. К таким работам следует отнести исследования [2–7].

Современные методы разработки и оптимизации прототипов СФЗ. При разработках новых конструкций СФЗ до настоящего времени в основном применялся метод экспериментального исследования, реализуемый как в лаборатории, так и в натурных (полигонных)

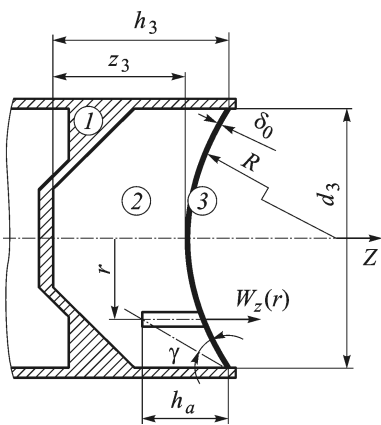


Рис. 1. Схема СФЗ с КО (в данном случае сегментной и равнотолщинной):

1 — корпус; 2 — разрывной заряд ВВ; 3 — кумулятивная облицовка

условиях при использовании главным образом импульсной рентгенографии (1-я, 2-я и 4-я стадии функционирования), а также и оптической скоростной регистрации (3-я стадия функционирования). Однако приближенная оценка параметров разрабатываемых СФЗ, оценка параметров его модели или прототипа, предшествующие изготовлению экспериментальных образцов для лабораторных или полигонных исследований, проводились и часто проводятся до настоящего времени с помощью инженерных методов расчета.

Инженерные методы расчета основаны на обобщении большого объема информации, накопленной в течение длительного периода экспериментальных исследований, и на использовании аналитических решений задач в упрощенной постановке.

Так, в рамках инженерного подхода к анализу 1-й и 2-й стадий функционирования СФЗ обычно рассматривают (используют) схему взрывного устройства (см. рис. 1) и следующие формулы:

$$W_z(r) = 0,354D \sqrt{\frac{3\beta(r)}{3 + \beta(r)}}, \quad (1)$$

$$W_{ПЭ}^* = \frac{1}{m_{ПЭ}} \int_r W_z(r) dm(r), \quad (2)$$

где $\beta(r)$ — коэффициент нагрузки, равный отношению произведений характерных толщин слоев материалов (КО и ВВ) и плотностей этих материалов: $h_a(r)\rho_{ВВ}/(\delta_0(r)\rho_{ПЭ})$; $dm(r)$ — масса элемента КО; $W_z(r)$ — осевая составляющая скорости массы элемента, приобретенная в конце 1-й стадии функционирования СФЗ; D — скорость детонации взрывного заряда ВВ.

Формула (1) получена из решения задачи об одномерном метании пластины (толщиной δ_0 и плотностью $\rho_{ПЭ}$), продуктами детонации ВВ, для которого удельная теплота полного взрывного превращения Q может быть связана со скоростью детонации D простейшим для теории детонации (и приближенным) соотношением $D = \sqrt{2(n^2 - 1)Q}$.

В последнем выражении n — это показатель энтропии в выражении $e = (pv)/(n - 1)$, которое можно использовать для аппроксимации связи удельной внутренней энергии e продуктов детонации конденсированных ВВ с давлением p и их удельным объемом v . При этом n неявно отражает соотношение давлений в продуктах детонации упругого (холодного) и теплового происхождений. Для того чтобы получить простейшую формулу (1), полагают $n = 3$.

Текущее значение высоты активной части заряда $h_a(r)$, отражающее влияние на движение продуктов детонации боковой волны

разгрузки, определяется боковой поверхностью с углом конусности $\gamma \approx \operatorname{arctg} 0,5$.

Формула (2), полученная на основе закона сохранения импульса, отображает следующее обстоятельство. Неоднородное распределение по радиальной координате осевой составляющей скорости движения элементов КО $W_z(r)$ на этапе инерционного деформирования в условиях пренебрежимо слабого влияния продуктов детонации в конечном счете вследствие диссипативных процессов в деформируемом материале КО может привести к образованию целостного ПЭ массой $m_{\text{ПЭ}}$ (незначительно меньшей, чем масса КО) некоторой компактной формы, летящего со скоростью $W_{\text{ПЭ}}^*$, которая в первом приближении может считаться скоростью соударения с преградой $W_{\text{ПЭ}}$.

Формулы (1) и (2) для приближенных вычислений отражают только необходимые условия для нормального функционирования СФЗ на 1-й и 2-й стадиях, но не условия, являющиеся достаточными.

Если можно было бы ограничиться формальным описанием выбора рациональных параметров СФЗ, то формулы (1) и (2) следовало бы дополнить выражением или системой выражений, связывающих распределение скорости движения элементов КС (на примере $W_z(r)$) с геометрическими и физико-механическими характеристиками КО и ее материала, при которых в конце 2-й стадии ПЭ или бóльшая часть его массы сохраняет целостность. Однако получение явных конечных выражений для условия целостности ПЭ в конце 2-й стадии в настоящее время не представляется возможным. Причиной этого являются сложные условия деформирования материала формируемого ПЭ и недостаточное знание условий разрушения материалов в этих условиях деформирования.

На практике разработки новых конструкций СФЗ типа SADARM вместо попыток получения замкнутой системы уравнений, включающей уравнения (1), (2) и условие целостности, или сохранности метаемого ПЭ, и использования ее при проектировании поступают иным образом.

Задавшись значением скорости ПЭ $W_{\text{ПЭ}}$ из диапазона 1,8...2,5 км/с и используя эмпирические соотношения [1], находят массу ПЭ $m_{\text{ПЭ}}$, которая необходима для пробития заданной преграды. Далее используют обобщение опыта предыдущих разработок в виде формулы, связывающей $m_{\text{ПЭ}}$ с плотностью материала ПЭ $\rho_{\text{ПЭ}}$ и с диаметром заряда СФЗ d_3 . Это позволяет при выбранном материале ПЭ найти необходимый диаметр заряда СФЗ d_3 .

Значения остальных параметров СФЗ и КО находят так же, используя эмпирически установленные критерии формирования целостного ПЭ. Например, при необходимости получения медных компактных ПЭ из конических КО следует принимать: толщину облицовки

$\delta_0 = (0,03 \dots 0,04)d_3$, прогиб $h_3 - z_3 = 0,1d_3$, угол раствора конуса $2\alpha = 150 \dots 160^\circ$. При этом высота заряда h_3 , при которой из 70...90% начальной массы КО на пути длиной $10 \dots 15d_3$ завершается формирование целостного ПЭ диаметром $d_{ПЭ} = (0,3 \dots 0,6)d_3$ и длиной $(0,9 \dots 0,4)d_3$, равна $(0,6 \dots 1,5)d_3$.

При таких соотношениях диаметра d_3 и высоты h_3 заряда скорость $W_{ПЭ}$ составляет 25–35% скорости детонации таких наиболее употребительных при изготовлении кумулятивных зарядов ВВ, как состав “В”, октол 75/25, окфол. Эти вещества в отличие от алюминизированных составов являются ВВ повышенного бризантного действия. При такой оценке параметров СФЗ учитывают, что с увеличением мощности, бризантности ВВ наблюдается увеличение удлинения сформированного ПЭ (отношение его длины к его диаметру). Для поражения современных бронечелей требуется достижение достаточно высокого удлинения ПЭ (более 3–4) и его формы, необходимой для высокой аэродинамической устойчивости.

Для СФЗ с РЗ из ВВ повышенного фугасного действия подобные эмпирические соотношения отсутствуют. Более того, достаточно распространено мнение, что добавки алюминия к высокобризантным ВВ не позволяют получить составы перспективные в отношении использования их для снаряжения кумулятивных БП, в частности, СФЗ.

Анализ научно-технической информации показывает, что в настоящее время существенно меняется подход к разработке конструкций БП, в частности устройств типа SADARM. Одним из основных методов, используемых при выборе оптимальных или рациональных конструктивных решений на стадии разработки новых или модернизации существующих типов СФЗ для боеприпасов типа SADARM, становится компьютерное моделирование их функционирования. Это приводит в конечном счете к существенной экономии временных и материальных затрат на стадии окончательной проверки или отработки принятых решений в отношении конструкции деталей БП и их материалов. Такие изменения в подходе к разработке БП с СФЗ в значительной мере связаны с развитием конечно-разностных методов вычислительной математики (равно как и с развитием вычислительной техники и систем интерфейса), с появлением адекватных уравнений состояния (УРС) продуктов детонации широкого круга традиционных идеально детонирующих ВВ и экспериментально-расчетных методов нахождения параметров этих УРС, адекватных моделей физико-механического поведения металлов в рамках представлений механики сплошных сред.

Сравнительно простым в принципиальном отношении представляется математическое моделирование динамики движения сформированного ПЭ с учетом уже известных параметров дестабилизирующих факторов. Это может быть осуществлено с использованием приближенных расчетных методик и численного решения задачи пространственного обтекания симметричного или осесимметричного тела потоком совершенного газа [3, 7].

Более сложной является проблема адекватности математического моделирования стадий функционирования СФЗ, обусловленных характеристиками сжимаемости и деформирования конденсированных сред, в частности материала КО. В настоящее время применительно к разработке компьютерных методов проектирования прототипов СФЗ наибольшее внимание уделяется задачам математического моделирования 1-й и 2-й стадий функционирования СФЗ.

Основные исследования, связанные с компьютерным моделированием функционирования СФЗ с алюминизированными ВВ. Достоверность результатов математического моделирования этих стадий функционирования в настоящее время обуславливается главным образом степенью адекватности описания деформирования и разрушения сжимаемого металла КО и УРС продуктов детонации.

Описание деформирования и разрушения сжимаемого металла КО, используемое в моделировании процессов 1-й и 2-й стадий функционирования СФЗ, получено на основании согласования расчетных и экспериментальных результатов исследований, выполненных применительно к РЗ из высокобризантных ВВ. Описание этих характеристик металлов необходимо и в случае рассматриваемых алюминизированных ВВ, отличающихся от веществ повышенного бризантного действия как параметрами детонации, так и свойствами продуктов детонации. Поэтому кратко изложим сведения о металлах, которые необходимы для удовлетворительного моделирования поведения деталей из них под действием детонационной волны.

Деформация сжимаемого металла полагается упругопластической. При этом учитывается (в лучшем случае) то, что предел текучести с ростом интенсивности и скорости деформации увеличивается, а с ростом температуры — уменьшается. Для описания зависимости предела текучести от этих факторов обычно используют модели Церилли–Армстронга [8] (для меди), Джонсона–Кука [9] или Стейнберга–Кохрана–Куинена [10] (для стали и тантала). Задача о разрушении, критическая при разработке конструкций, функционирующих в условиях интенсивных импульсных воздействий, в принципе, может решаться различным образом.

С точки зрения экономии машинного времени предпочтительным является использование технических моделей или критериев. Например, авторы работ [2, 4] при расчетах функционирования СФЗ с РЗ из высокобризантных ВВ с КО из стали 11ЮА используют простейший прочностной критерий, в соответствии с которым полагается, что при превышении интенсивности растягивающих напряжений предельного значения, называемого откольной прочностью σ_p^* , металл теряет свою прочность (предел текучести становится равным нулю) и начинает вести себя как сыпучая среда. Эффективное значение σ_p^* подбирается из условия согласования изображений деформированных без нарушения целостности или уже разрушенных, нецелостных ПЭ, полученных с использованием рентгеноимпульсной съемки взрыва тестовых лабораторных СФЗ с таким же ВВ, как в расчетах, и методом математического (компьютерного) моделирования функционирования этого заряда.

С точки зрения подробности описания динамического процесса разрушения металла более предпочтительными являются кинетические модели. В качестве примера приведем подход авторов [11], которые модифицировали известную модель NAG (Nucleation and Growth) и получили кинетическое уравнение для поврежденности среды, характеризующейся объемной долей сферических пор в рассматриваемой зоне деформированного металла. Это уравнение описывает образование (зарождение) и рост микроповрежденностей среды в виде сферических пор. Достижение поврежденностью критического значения постулируется как наступление момента разрушения материала. Разрушенное вещество уже не сопротивляется расширению. Эффективные значения параметров этого уравнения находятся методом подгонки результатов математического (компьютерного) моделирования к экспериментальным характеристикам тестового процесса. Методика тестирования, предложенная авторами, в отличие от рентгеноимпульсной съемки процесса деформирования позволяет получать предельно ясные и четкие экспериментальные данные. Тестовая сборка по этой методике представляет собой стержень исследуемого металла, цилиндрическая поверхность которого покрыта слоем ВВ, по которому распространяется скользящая детонационная волна. Толщина слоя ВВ многократно нарастает ступенчатым образом в направлении распространения детонации. В результате ударно-волнового сжатия и последующего разрежения металла в стержне образуется осевая полость конической формы. Настройка эффективных значений параметров кинетического уравнения зарождения и роста поврежденностей заключается в достижении удовлетворительного совпадения

расчетных и экспериментально полученных геометрических параметров осевой полости. Очевидно, что подобного рода эксперименты в отношении установления и описания связи упругопластических характеристик и условий разрушения металла с интенсивностью фронта ударной волны, проходящего по материалу КО и изменяющего его первоначальные физико-механические характеристики, являются более простыми и информативными по сравнению с рентгеноимпульсными исследованиями динамики или постэффектов деформирования КО СФЗ.

При математическом (компьютерном) моделировании силовых воздействий со стороны детонирующего заряда ВВ на КО, приводящих к ее ускорению и деформированию, в настоящее время чаще всего используют УРС продуктов детонации Джонсона–Уилкинса–Ли или уравнения, подобные этому, но отличающиеся функциями для описания зависимости холодных составляющих давления и удельной внутренней энергии продуктов детонации от их удельного объема. Эффективные значения части параметров этих УРС вычисляют, исходя из экспериментально определяемых детонационных характеристик заряда ВВ, а для подбора значений другой части параметров используют результаты экспериментов (называемых “цилиндр-тестами”) с регистрацией динамики расширения тестовой медной цилиндрической оболочки под действием продуктов детонации испытуемого заряда ВВ, заполнявшего эту оболочку. До последнего времени можно было воспользоваться значениями параметров УРС JWЛ, найденных лишь для ВВ и взрывчатых составов, не содержащих сравнительно медленно реагирующих энергетических добавок, в частности добавок алюминия, т.е. для ВВ, которые можно отнести к веществам повышенного бризантного действия.

Это обстоятельство существенно затрудняло использование математического моделирования при разработке или анализе действия взрывных устройств с алюминизированными ВВ и неидеально детонирующими веществами (которые традиционно относят к составам повышенного фугасного действия).

Добавка алюминия к составам на основе таких высокобризантных ВВ, как гексоген и октоген, приводит к некоторым особенностям метательного действия РЗ, рассматриваемым, в частности, в работе [12]. Добавка алюминиевых частиц к таким ВВ наряду с повышением энергии, выделяющейся при взрывной реакции, определяемым в основном взаимодействием алюминия с продуктами детонационного разложения основного бризантного компонента взрывчатого состава, может привести к уменьшению доли энергии, которая переходит в полезную форму — в нашем случае кинетическую энергию метаемой пластины,

оболочки или КО. Поэтому использование для расчетов скорости метания оболочек или их элементов формулы (1) или ей подобных может приводить к существенно неточным результатам.

Значительный прогресс в области использования математического моделирования при поиске путей совершенствования боеприпасов, традиционно наполнявшихся ранее только типичными бризантными ВВ, стал возможным после того, как авторами [13] и [14] были реализованы оригинальные подходы к разработке так называемых модернизированных УРС JWЛ применительно к задачам целенаправленного изменения бризантного и метательного действий зарядов алюминизированных ВВ.

Ограничимся комментариями к варианту модернизированного УРС JWЛ, предложенному автором [14], которое для удобства изложения запишем вместе с уравнением кинетики сгорания частиц алюминия в продуктах детонации:

$$p = p_{\lambda=0} + \frac{\omega}{V} \lambda Q_{Al},$$

$$p_{\lambda=0} = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V},$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{6a}{d_0} p^{0,3} (1 - \lambda)^{2/3},$$

где ω , A , B , R_1 , R_2 — константы; $V = v^* \rho_0$ — относительный удельный объем, равный отношению удельных объемов продуктов взрыва к удельному объему заряда ВВ в начальном состоянии $v_0 = 1/\rho_0$; E — удельная (в единице объема) внутренняя энергия, равная отношению удельной внутренней энергии e (на единицу массы) к начальному удельному объему заряда ($E = e^* \rho_0$); λ — степень разложения (отношение массы алюминия, прореагировавшего с продуктами разложения основных взрывчатых компонентов заряда, к начальной массе алюминиевой добавки); Q_{Al} — удельная (на единицу объема) теплота сгорания алюминия в продуктах разложения основных взрывчатых компонентов заряда; a — настроечный коэффициент; d_0 — диаметр частиц алюминия, добавляемых в заряд ВВ.

Автором работы [14] также предложен экспериментально-расчетный метод нахождения эффективных значений параметров УРС (констант ω , A , B , R_1 , R_2) и кинетического уравнения (настроечного коэффициента a). Этот метод основан на использовании результатов испытаний ВВ в “цилиндр-тесте” (с медной трубкой внутренним диаметром 25,4 мм и толщиной стенок 2,6 мм), отечественным аналогом которого является проба с медной трубкой диаметром 20 мм и толщиной

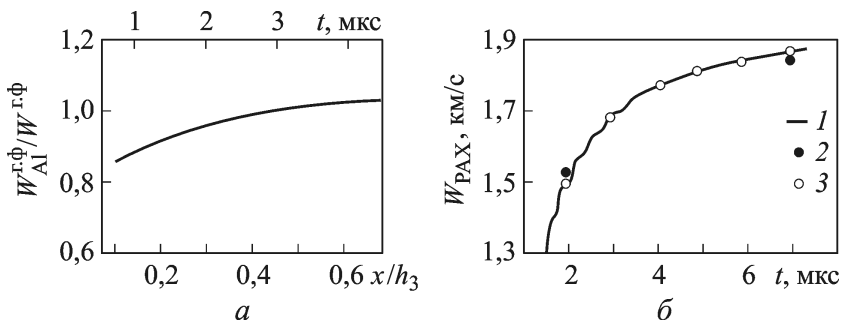


Рис. 2. Влияние добавки алюминия:

a — зависимость от времени t и пути x разгона [12] отношений скоростей медных пластин толщиной 1,5 мм, метаемых при плоскосимметричном расширении продуктов детонации слоя ВВ толщиной $h_3 = 15$ мм из алюминизированного (20% Al) и неалюминизированного флегматизированного гексогена; *б* — сопоставление (экспериментальных и расчетных) данных по разгону медной оболочки в цилиндр-тесте с РАХ-30; 1 — расчет автора [14], 2 — расчет авторов [15], 3 — эксперимент [15]

стенок 2 мм. С учетом возможности очень больших времен дополнительного выделения энергии (энерговыведения) за детонационным фронтом следует предполагать необходимость создания в дальнейшем дополнительных методик экспериментальной регистрации динамики расширения трубок с большими начальными диаметрами.

Для проверки работоспособности предложенного метода нахождения параметров УРС была проведена настройка параметров модернизированного УРС JWL и кинетики сгорания алюминиевой добавки к составу на основе октогена. При этом использовались результаты экспериментальных исследований с применением “цилиндр-теста” одного из наиболее перспективных составов РАХ-30. Как показано на рис. 2, экспериментальные данные согласуются с результатами математического моделирования двумерного движения тестовой медной оболочки в “цилиндр-тесте” лучшим образом, если при этом используется модифицированное УРС JWL, предложенное в работе [14]. Использование подобного УРС, разработанного авторами [13, 15], дает несколько худший результат.

Результаты расчетов для СФЗ с алюминизированными ВВ типа РАХ. Для того чтобы показать возможности использования компьютерного моделирования функционирования при разработке прототипов БЧ типа SADARM с РЗ СФЗ из алюминизированного ВВ, которые могут появиться при наличии такого экспериментально расчетного комплекса и соответствующей базы данных по ВВ и металлам, мы приведем результаты серии оригинальных расчетов, связанных с оценкой возможности улучшения функциональных и эксплуатационных характеристик СФЗ боеприпаса SMarT-155 за счет использования ВВ типа РАХ. При этом мы использовали информацию, тестовых экс-

периментов с различными материалами, выполненных и опубликованных в США.

На рис. 1 показана схема рассматриваемого прототипа СФЗ боеприпаса SMArt-155 с РЗ из штатного состава LX-14 и с медной сегментной КО радиусом $R = 110$ мм и толщиной $\delta_0 = 2,5$ мм.

Характеристики прессового состава LX-14 с термопластичным связующим Eстан частично приведены в таблице. Эта таблица содержит также данные для некоторых других ВВ, в частности перспективных, последствия замены которыми штатного состава LX-14 представляют несомненный интерес. Составы окфол 3,5 и ОМА приведены в таблице как аналоги LX-14 (при этом индекс ТП указывает на термопластичность связующего).

В таблице используются следующие обозначения: D — это скорость детонации при значении начальной плотности зарядов ρ_0 , приведенной в таблице. Давление на поверхности Чепмена–Жуге (или давление детонации) и удельная теплота взрывчатого превращения, протекающего в зоне детонационной реакции перед поверхностью Чепмена–Жуге и на ней, обозначены соответственно p_{CJ} и Q_{CJ} . Удельная энергия, выделяемая в результате взрывного превращения ВВ к моменту полного расширения продуктов взрыва, обозначена $Q_{V/V_0=\infty}$.

Отметим, что первый компонент в связующем BDNPA/F+CAP является энергетическим (взрывчатым) пластификатором. Такое связующее позволяет методом высокопроизводительного специального прессования получать из порошков основного ВВ с определенным распределением зерен по размеру заряды с плотностью 99 % TMD (РАХ-29); 98,5 % TMD (РАХ-30); 99,5 % TMD (РАХ-42). Столь высокие относительные плотности зарядов и соответственно очень низкие значения пористости способствуют существенному понижению ударно-волновой чувствительности по сравнению с зарядами того же основного ВВ, имеющими относительную плотность 93–95 %.

Задачи повышения бронепробивного действия СФЗ (или их могущества) в настоящее время должны решаться в рамках проблемы улучшения соотношения показателей действия при санкционированном штатном инициировании детонации заряда, показателей эксплуатационной стойкости к внешним воздействиям, потенциально способным возбудить несанкционированный разрушительный взрыв боеприпаса, и показателей стоимости изготовления заряда ВВ (на единицу его массы). Поэтому в первом приближении можно считать неприемлемым повышение могущества действия БП путем использования нового ВВ с повышенной ударно-волновой чувствительностью.

Замещение в РЗ основного взрывчатого компонента на более мощное ВВ (с большими значениями таких характеристик, как Q_{CJ} , p_{CJ}),

Характеристики некоторых мощных традиционных и новых ВВ

Обозначение	Основное ВВ и его содержание, %	Содержание добавки Al, %	Связующее и его содержание, %	ρ_0 , г/см ³	D, км/с	P_{CJ} , ГПа	Q_{CJ} , МДж/кг	$Q_V/Y_0=\infty$	Стоимость, \$/фунт
LX-14	Октоген, 95,5	0	Estan, 4,5	1,835	8,8	37	5,56	–	18
	Октоген, 92	0	BDNPA/F+CAP 4,8+3,2	1,821	8,77	33,8	–	5,57	18
PAX-30	Октоген, 77	15	BDNPA/F+CAP 4,8+3,2	1,885	8,34 (7,94)	24,2	7,18	6,9	18
LX-19	CL-20, 95,5	0	Estan**, 4,5	1,98	9,44	41,8	–	–	600
PAX-29	CL-20, 77	15	BDNPA/F+CAP, 4,8+3,2	1,96	7,92, (9,23)	28,7 (38,4)	7,5	7,81	600
PAX-42	Гексоген, 77	15	BDNPA/F+CAP, 4,8+3,2	1,83	8,147	23,4	7,15	7,96	7
Окфол 3,5	Октоген, 96,5	0	Окисин (окисленный церезин), 3,5	1,76	8,7	–	5,23	5,23	–
ОМА	Октоген	0	ТП**	1,84	8,84	–	–	–	–

* Связующее, аналогичное эстану. ** Термопластичное связующее.

безусловно, способно привести к усилению действия БП. Но при отсутствии дополнительных микроструктурных гомогенизирующих изменений заряда такое усиление действия заряда при штатном инициировании будет сопровождаться повышением его чувствительности к сравнительно слабым ударно-волновым несанкционированным внешним воздействиям. Такой способ повышения могущества действия взрывных устройств не удовлетворяет требованиям улучшения соотношения показателей действия и эксплуатационной стойкости. Причина такого явления рассмотрена в [16, 17].

Одним из способов повышения показателей действия взрывных устройств при соблюдении условия улучшения соотношения их могущества и эксплуатационной стойкости является введение в заряд энергетических добавок, которые избирательно влияют на удельное энерговыделение заряда: существенно повышают его при штатных детонационных начальных инициирующих импульсах и существенно снижают его на начальных стадиях разложения заряда при сравнительно слабых ударно-волновых внешних несанкционированных воздействиях. Частицы алюминия можно отнести к такого рода добавкам [16, 17].

Заряды с высоким содержанием (20...30%) алюминиевых добавок, отличающиеся большим временем дореагирования алюминия (заканчивающегося, как правило, уже за счет кислорода атмосферы), используют в БП в основном в целях повышения фугасного и зажигающего действий.

Длительное дореагирование, или торможение окисления, алюминия объясняется тем, что окислительных компонентов в продуктах детонации хватает для быстрого сгорания алюминия в количестве ориентировочно 15% начальной массы всего заряда, после чего из-за чрезмерно уменьшившейся концентрации окислительных компонентов диффузионное окисление металла практически прекращается до тех пор, пока не наступит турбулентное перемешивание продуктов взрыва с воздухом.

При начальном содержании алюминиевой добавки 15% (и менее) окислительных элементов в продуктах детонации хватает для практически полного окисления энергетической добавки за время ≈ 10 мкс, т.е. за время, характерное для отбора энергии от продуктов детонации при их метательном действии. В случае зарядов с начальной плотностью 95% (и менее) ТМД существенная часть алюминиевой добавки окисляется уже за время порядка единиц микросекунд [12]. Уменьшение пористости должно интенсифицировать начальную стадию окисления алюминиевых частиц, связанную в значительной мере с разрушением и обдиркой окисной пленки на их поверхности.

Эксперименты [12] показывают, что введение в заряд добавок алюминиевых частиц размером порядка 10 мкм в количестве 20...15% начальной массы основного ВВ — гексогена приводит к существенному снижению начального темпа разгона продуктами детонации метаемых оболочек (в течение порядка единиц микросекунд), что и следовало ожидать, принимая во внимание снижение давления детонации у алюминизированных ВВ на основе октогена и гексогена по сравнению с ВВ без добавок алюминия. Поэтому в случае метания металлических оболочек алюминизированными ВВ следует ожидать снижения степени поврежденности материала оболочки на начальной стадии ее разгона по сравнению с нагружением оболочек неалюминизированными зарядами.

Отмеченные особенности дают основания считать составы РАХ-30 (на основе октогена) и РАХ-42 (на основе гексогена) среди ВВ, приведенных в таблице, наиболее перспективными для замены ими в СФЗ боеприпаса SMarT-155 штатного заряда LX-14. Для более четкого выделения влияния на функционирование СФЗ сравнительно малых добавок алюминия к основному мощному ВВ при математическом моделировании в качестве ВВ, альтернативного LX-14, следует принять состав на той же основе (октогена) — РАХ-30.

Были проведены расчеты с использованием гидрокода RUSS-2DE [18]. Машинное время одного варианта моделирования практически полного формирования ПЭ в течение 300 мкс в случае применения сетки размером 0,5×0,5 мм и использования компьютера с четырехъядерным процессором и тактовой частотой 4 ГГц составляло 12 ч.

На рис. 3 и рис. 4 приведены результаты расчета для СФЗ, разрывной заряд которого состоит из LX-14. Результат, представленный на

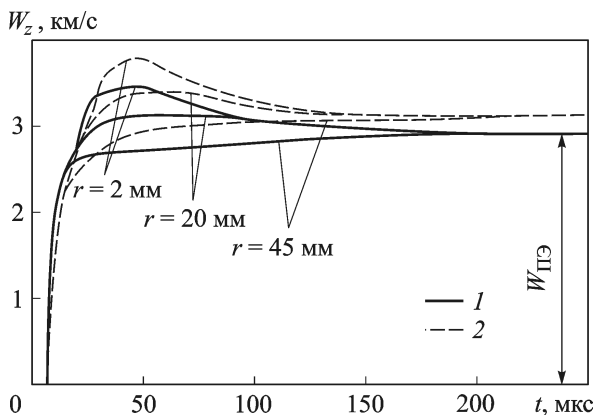


Рис. 3. Динамика ускорения элементов сегментной кумулятивной оболочки с начальным радиусом $R = 110$ мм продуктами детонации LX-14 (кривые 1) и с начальным радиусом $R = 95$ мм продуктами детонации РАХ-30 (кривые 2) (r — начальное расстояние элементов оболочки от ее оси симметрии)


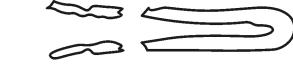


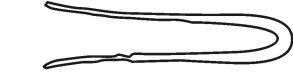
R , мм	Форма ПЭ на 300-й мкс
100	
105	
110	* 
115	
120	

Рис. 4. Влияние начального радиуса R сегментной равнотолщинной оболочки из меди СФЗ с LX-14 на формирование ПЭ (* – наиболее рациональная форма ПЭ)

Исходя из знаний в области аэродинамики и закономерностей бронепробивного действия ударников и интуитивных инженерных соображений, можно с высокой достоверностью заключить, что КО с $R = 110$ мм является наиболее рациональной в отношении аэродинамической устойчивости на подлете к преграде и в отношении пробития ее. В этом можно убедиться, прибегнув к математическому моделированию 3-й и 4-й стадий функционирования ПЭ с использованием существующих вычислительных программ. В реальном БП SMarT-155 радиус сегментной КО, являющейся, по-видимому, результатом экспериментального контролируемого поиска рационального варианта исполнения, имеет то же значение $R = 110$ мм, что и в нашем расчетном рациональном варианте. Это обстоятельство рассматривается нами как некоторое обоснование оптимизма в отношении к достоверности результатов проводимых расчетов и использования наших моделей и гидрокода для анализа процессов на 1-й и 2-й стадий функционирования СФЗ.

Результаты моделирования процессов 1-й и 2-й стадий функционирования СФЗ, в котором ВВ заряда LX-14 заменено на состав PAX-30, приведены на рис. 3 и 5. При сохранении неизменными размеров заряда d_3 и h_3 наиболее рациональная форма ПЭ получается, как это видно на рис. 5, при радиусе сегментной медной КО толщиной 2,5 мм, равном уже $R = 95$ мм. При этом масса сформированного ПЭ получается

рис. 3, получен для модели СФЗ с точно такими же геометрическими параметрами, как у штатного изделия. На рис. 4 показаны результаты расчета при различных значениях радиуса R равнотолщинной сегментной оболочки толщиной $\delta_0 = 2,5$ мм. При этих вариантах расчетов геометрические параметры d_3 и z_3 оставались такими же, как штатного изделия. На рис. 3 начальная часть зависимости осевой составляющей скорости (начиная с $W_z = 0$) показана только для участков КО, лежащих вблизи оси симметрии (при $r = 2$ мм). Это упрощение рисунка допущено в целях облегчения визуального восприятия последующих изменений в динамике разгона КО под влиянием добавок алюминия.

приблизительно на 2% больше, чем при $R = 110$ мм, а скорость ПЭ становится равной 3,14 км/с, против 2,899 км/с в случае базового варианта, при котором заряд состоит из LX-14 и $R = 110$ мм. Таким образом замена LX-14 на PAX-30 при дополнительно проведенной рационализации параметра КО R с 110 мм до 95 мм приводят к повышению приблизительно на 18% кинетической энергии ПЭ СФЗ. Заметим, что детонационная удельная теплота взрыва $Q_{СД}$ у PAX-30 выше, чем у LX-14, на 29%, а энерговыделение при полном расширении продуктов взрыва у PAX-30 выше, чем у LX-14, приблизительно на 22%.

Замена LX-14 на PAX-30 (см. рис. 3) существенно замедляет набор скорости центральной частью КО (снижение темпа набора скорости так же ясно выражено и для периферийных элементов КО). Такая особенность связана с ослаблением интенсивности чередующихся на начальной стадии ускорения металла (имеющего явно волновой характер) процессов ударно-волнового сжатия и разрежения среды. Исходя из положений NAG-модели можно предположить, что это приведет к ослаблению интенсивности зарождения и развития поврежденности металла на начальной стадии разгона КО и к тенденции предотвращения пластического разрушения ее материала на последующей 2-й стадии функционирования СФЗ. К сожалению, упругопластическая модель меди, использованная в расчете, не дополнена кинетическим уравнением зарождения и развития поврежденности материала КО и не позволяет проследить за всеми последствиями замены LX-14 на алюминизированное ВВ PAX-30.

Как отмечалось ранее [4], удачное соотношение сравнительно высокой прочности и пластичности у стали марки 11ЮА (модуль сдвига 80,9 ГПа, динамический предел текучести 0,5 ГПа, откольная прочность 1,65 ГПа, относительное сужение 73%) и у железа “Армко” марок № 1, № 2, № 3, № 4 делают эти материалы в отношении их использования для изготовления КО более предпочтительными, чем медь (модуль упругости 47,7 ГПа, предел текучести 0,12 ГПа).

R , мм	Материал КО	
	Медь	Тантал
90		
95	*	
100		
105		*
110		
115		
120		

Рис. 5. Влияние начального радиуса R сегментной равнотолщинной КО и ее материала на формирование ПЭ СФЗ с PAX-30

Нельзя исключать того, что наиболее предпочтительным материалом для КО окажется тантал (если не принимать во внимание его стоимость), у которого модуль сдвига равен 69 ГПа, а предел текучести — 0,77 ГПа. У тантала существенно большая плотность — 19,69 г/см³ против 8,93 г/см³ у меди и 7,85 г/см³ у стали, что при прочих равных условиях способствует улучшению бронепробивной способности ПЭ.

На рис. 5 представлены некоторые результаты расчетов для оценки последствий двойной модернизации СФЗ SMArt-155: замены материала КО (меди на тантал) у заряда, в котором LX-14 уже заменено на PAX-30. Видно, что наиболее удачная в отношении бронепробития форма ПЭ из тантала получается для двухмиллиметровой сегментной КО с начальным радиусом $R = 105$ мм, вместо 95 мм для медной КО (у СФЗ с LX-14 наиболее удачный начальный радиус был $R = 110$ мм).

Танталовая КО с $R = 105$ мм под действием продуктов детонации PAX-30 образует ПЭ, который в конце 2-й стадии функционирования имеет скорость $W_{\text{ПЭ Ta}} = 2,19$ км/с (против $W_{\text{ПЭ Cu}} = 3,14$ км/с у медного ПЭ). При практически равных объемах ПЭ, но при чуть менее двукратной разности плотностей материалов ПЭ кинетическая энергия танталового ПЭ при той же двухмиллиметровой толщине, что и у медной КО, получается на 9,3 % меньше. При таком снижении кинетической энергии ударника следует ожидать существенного уменьшения бронепробития.

Вопрос о методах устранения потерь кинетической энергии ударника, метаемого зарядом ВВ, которые возникают вследствие повышения плотности материала КО, равно как и вопрос о возможности компенсации потерь 9 % кинетической энергии повышением плотности и твердости материала ПЭ представляют уже отдельную задачу. Для ее решения необходимо использование моделирования не только 1-й и 2-й стадий функционирования СФЗ, но и моделирование взаимодействия ПЭ с преградой, с учетом особенностей влияния поллой формы последнего [19].

Здесь мы ограничимся тем замечанием, что при переходе к алюминизированным ВВ, вызывающем увеличение времени полного выделения энергии от реакции его компонентов и уменьшение скорости движения КО на начальной стадии ее ускорения в дополнение к замедляющему влиянию снижения коэффициента нагрузки β от увеличения плотности метаемой оболочки проявляется еще один фактор, подробно рассмотренный в [12]. С уменьшением пиковых давлений в начале разгона оболочки, с увеличением ее инерционности и с замедлением полного выделения энергии химической реакции возрастают потери кинетической энергии ударника (КО), связанные с тем, что увеличивается количество энергии, истекающей в направлении, отличном от

направления движения ударника. Эти потери наиболее велики в схемах метания, при которых поток материала метаемого ударника является сходящимся, а поток продуктов взрыва в направлении, отличном от направления его движения, — расходящимся, и не сдерживается инерционной оболочкой — корпусом взрывного устройства (СФЗ) или инерционность этого корпуса очень мала. Снизить потери кинетической энергии ПЭ, вызванные повышением плотности материала КО и соответствующим ему уменьшением коэффициента нагрузки β , можно, применив комбинированные РЗ, у которых алюминизированное ВВ располагается между КО и бустерным высоко бризантным ВВ, продукты детонации которого подпирают сравнительно медленно дореагирующие продукты взрыва и затрудняют отток механической энергии в направлении, не совпадающем с движением КО и ее элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабкин А.В.* Средства поражения и боеприпасы / А.В. Бабкин, В.А. Велданов, Е.Ф. Грязнов и др.; под общ. ред. В.В. Селиванова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 984 с.
2. *Колтаков В.И., Кружков О.А., Шкунов Н.В.* Математическое моделирование взрывного деформирования удлиненного поражающего элемента кумулятивного снаряда (Тест П.И. Улякова) // *Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. Материалы VI Всеросс. науч. конф., посвященной 130-летию Томского гос. ун-та и 40-летию НИИ прикладной математики и механики Томского гос. ун-та.* Томск. 2008. С. 253–254.
3. *Колтаков В.И., Баскаков В.Д., Шкунов Н.В.* Математическое моделирование функционирования снарядообразующих зарядов // *Труды междунар. конф. “XIX Харитоновские тематические научные чтения”.* Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. РФЯЦ–ВНИИЭФ. Саров, 2009. С. 488–494.
4. *Потапов И.В., Колтаков В.И., Шкунов И.В., Якимов Г.А.* Математическое моделирование взрывного формирования стальных поражающих элементов. International Conference. Shock Waves in Condensed Matter. Saint-Petersburg Novgorod, Russia. 5–10 September. Novgorod. 2010. С. 184–188.
5. *Асмоловский Н.Л., Баскаков В.Д.* Численное моделирование процесса взрывного формирования удлиненных поражающих элементов со складчатой кормовой частью. International Conference. Shock Waves in Condensed Matter. Saint-Petersburg–Novgorod, Russia. 5–10 September. Novgorod. 2010. С. 188–190.
6. *Колтаков В.И.* Особенности деформирования и разрушения удлиненных поражающих элементов при взрывном нагружении кумулятивных облицовок // *Труды междунар. конф. “XIII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны”.* Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2011. С. 532–536.
7. *Баскаков В.Д., Колтаков В.И., Кружков О.А., Шкунов Н.В.* Анализ влияния кинематических возмущений технологической природы на траекторию движения формируемого взрывом удлиненного поражающего элемента // *Труды междунар. конф. “IX Харитоновские тематические научные чтения”.* Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2007. С. 581–584.
8. *Zerilli, R.W. Armstrong.* Dislocation mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations // *Journal of Applied Physics*, 1987, vol. 61(5), pp. 1816–1825.

9. *Johnson G.R., Cook W.H.* A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high temperatures // Proc. of the 7th Int. Symp. on Ballistics. Hague, Netherlands, 1983, pp. 541–547.
10. *Steinberg D.J., Cochran S.G., Guinan M.W.* A constitutive model for metals applicable of high-strain rate // Journal of Applied Physics. 1980, vol. 51, pp. 1498–1504.
11. *Расчетная модель изотропной кинетики пластического разрушения: сравнение двумерных расчетов и экспериментальных данных / Б.Л. Глушак, А.Г. Иоилев, А.А. Садовой и др. // Прочность, разрушение и диссипативные потери при интенсивных ударно-волновых нагрузках: сб. науч. ст. под ред. А.А. Садового, С.В. Михайлова. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2009. С. 270–277.*
12. *Андреев С.Г.* Влияние неидеальности детонирования зарядов ВВ на их метательное действие // Химическая физика. 1999. Т. 18. № 10. С. 80–87.
13. *Baker E.L., Capellos G. and Stiel L.I.* Generalized thermodynamic equation of state for reacting aluminized explosives. 13th Detonation Symposium (International). Norfolk, USA, 2006, pp. 1161–1170.
14. *Клименко В.Ю.* Численная модель для инженерных расчетов алюминизированных взрывчатых веществ. Горение и взрыв. Вып. 5 / под общ. ред. С.М. Фролова. М.: Торус Пресс, 2012. С. 330–336.
15. *Baker E.L., Balas W., Steil L.I., Capellos C., Pincay J.* Theory and Detonation Products Equation of State for New Generation of Combined Effects Explosives // Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium. Miami, USA, 2007.
16. *Андреев С.Г.* Основы анализа соотношения мощности и стойкости к динамическим воздействиям зарядов ВВ // Оборонная техника. 1996. № 8–9. С. 21–25.
17. *Соотношение мощности действия и опасности при эксплуатационных воздействиях энергетических материалов: Отчет по теме “203.04.06.002” / МГТУ им. Н.Э. Баумана; Руководитель темы С.Г. Андреев. № ГР 01 2005 06723; Инв. № 02 2005 048 49. М., 2004. 166 с.*
18. *Romanov G.S., Suvorov A.E., Kozlov I.M., Klimenko V.Yu.* RUSS-2DE hydrocode with the TVD Procedure // Inter. Conference on New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes in Condensed Media. Oxford. UK. 1997, p. 401.
19. *Велданов В.А., Максимов М.А., Федоров С.В., Козлов В.С.* Особенности высокоскоростного взаимодействия трубчатых ударников с преградами // Труды междунар. конф. “IX Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны”. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2009. С. 474–477.

Статья поступила в редакцию 27.11.2012