

Метательное действие зарядов взрывчатых веществ при распространении иницирующих и детонационных волн

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

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва 105005, Россия

² НИИ «Геодезия», Красноармейск 119991, Россия

В статье рассмотрено влияние факторов (включая наличие добавки дисперсного алюминия), обуславливающих эволюцию иницирующей ударной волны в зарядах штатных взрывчатых веществ, на характеристики метательного действия зарядов. Проведено математическое моделирование влияния свойств добавок алюминия к низкопористым зарядам на изменения метательного действия в условиях стандартных методов определения метательной способности, а также в условиях функционирования снарядоформирующих зарядов. Показана возможность улучшения метательного действия снарядоформирующих зарядов при замене штатных взрывчатых веществ на низкопористые алюминизированные составы, аналогичные РАХ-30.

Ключевые слова: метание, иницирующая ударная волна, детонация, вторичная реакция, алюминий.

Введение. Изучение механизмов взрывных процессов, методов повышения эффективности использования энергии взрывчатых веществ (ВВ) и функционирования устройств с этими веществами являются до настоящего времени предметом научных исследований [1–6].

Метательная способность важная характеристика, определяющая потенциальную возможность продуктов детонации ВВ совершать полезную (требуемую) форму механической работы, в частности, в форме метания пластин и оболочек. Но в настоящее время приходится иметь дело со взрывными устройствами, при функционировании которых не могут по ряду причин реализоваться потенциально возможные показатели метательной способности (например, если заряд ВВ претерпевает детонационно-подобное или неидеальное детонационное превращение).

Функционирование таких устройств зависит не только от скорости, приобретаемой метаемой оболочкой или ее элементами, но и от максимальных (обычно начальных) давлений на них продуктов взрыва, превышение которыми некоторых характерных значений приводит, в конечном счете, к недопустимым ответным реакциям материалов метаемых деталей. При этом взрывные реакции, распространяющиеся в метательном заряде ВВ, в том числе и детонационные, могут иметь характеристики и особенности, которых нет при стандартных мето-

дах определения метательной способности. При разработке и модернизации устройств с подобными особенностями функционирования недостаточно знать метательную способность ВВ и ее связь с остальными, детонационными характеристиками заряда. В дополнение к метательной способности необходимо ввести в рассмотрение еще характеристику заряда ВВ в конкретных условиях его инициирования и воздействия продуктов взрыва на метаемую оболочку. Эту дополнительную характеристику мы назовем метательным действием заряда ВВ.

Метательное действие заряда будем характеризовать двумя величинами: скоростью метания оболочки и давлением продуктов взрыва на начальной стадии вовлечения ее в движение, реализуемыми при определенных условиях инициирования взрывного процесса. Достаточно часто бывает необходимо достигать скорости метания тел порядка 1 км/с при условии существенного снижения давления ударно-волнового воздействия на метаемые оболочки или другие детали относительно давлений, которые характерны при использовании мощных высоко бризантных ВВ с нормальными детонационными режимами, т. е. прибегать к реализации так называемого «мягкого» взрывного метания.

Один из способов реализации «мягкого» высокоскоростного метания связан с использованием неидеального режима детонации зарядов высокоэнергетических ВВ. Здесь под этим термином понимаются как стационарная детонация с существенным дополнительным тепловыделением от дореагирования продуктов разложения за детонационным фронтом, так и разложение заряда ВВ в результате эволюции в нем инициирующей ударной волны (ИУВ), обычно распространяющейся со значительно изменяющейся скоростью.

Наша работа направлена на выяснение **закономерностей** изменения и взаимосвязи характеристик метательного действия, возникающих как вследствие эффектов эволюции инициирующих ударных волн в твердых ВВ, так и особенностей сгорания добавок алюминия при детонации низкопористых зарядов на основе гексогена и октогена.

Метательное действие с торцов зарядов на основе гексогена и октогена. Из двух схем ускорения слоя металла с торцевой или боковой поверхности цилиндрического заряда ВВ первая в большей мере соответствует возможности выявления, хотя бы приближенного, особенностей метательного действия при неидеальном детонировании ВВ. На рис. 1, *a* приведена схема опытов (проведенных совместно с В.В. Зюзиным) с регистрацией «плоско симметричного разгона» медных дисков толщиной 1,5 мм и диаметром 50 мм, метаемых с торцов таблеток различных ВВ высотой h_c , приблизительно равной 15 мм. Отношение масс таблеток ВВ и медных метаемых дисков было во

всех опытах одинаковым. Иницирование детонации осуществлялась «плоско-параллельным» ударом дюралюминиевых пластинок толщиной 1,4 мм.

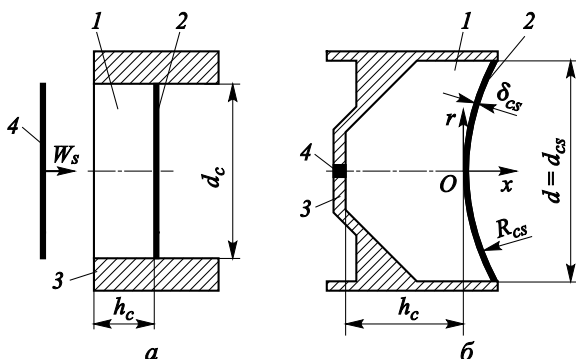


Рис. 1. Схемы взрывных устройств для торцевого метания пластины (а) и метания кумулятивной оболочки (б):

1 — заряд ВВ; 2 — метаемая пластина или кумулятивная оболочка; 3 — корпус; 4 — пластина или детонатор для иницирования ВВ

На рис. 2 показаны зависимости относительной кинетической энергии медной пластины E от пути, пройденного пластиной, в долях толщины таблетки ВВ $X = x/h_c$. Относительная кинетическая энергия пластины, метаемой исследуемым ВВ, определяется как отношение квадрата скорости пластины при исследуемом ВВ $W(X)$ к квадрату скорости $W_*(X)$, получаемой в опыте с «эталонным» процессом разгона метаемой пластины, т. е. с «эталонным» ВВ, инициируемым «эталонным» образом.

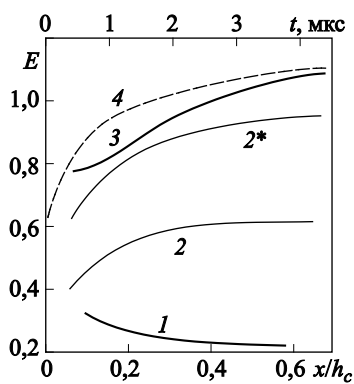


Рис. 2. Отношения кинетических энергий пластин при торцевом метании пробным зарядом (ПЗ) к кинетической энергии пластины при эталонных условиях (ЭУ):

1 — ПЗ-ГФ+20 % Al, $\rho_0 = 1,75 \text{ г/см}^3$, $\rho_{\text{ИУВ}} = 3,4 \text{ ГПА}$, $X_{SDT} > 1$; 2 — ПЗ-ГФ, $\rho_0 = 1,65 \text{ г/см}^3$, $\rho_{\text{ИУВ}} = 3,4 \text{ ГПА}$, $X_{SDT} > 1$; 2* — ПЗ-ОФ, $\rho_0 = 1,65 \text{ г/см}^3$, $\rho_{\text{ИУВ}} = 3,4 \text{ ГПА}$, $X_{SDT} = 0,7$; 3 — ПЗ-ГФ+20 % Al, $\rho_0 = 1,75 \text{ г/см}^3$, $\rho_{\text{ИУВ}} = 7,7 \text{ ГПА}$, $X_{SDT} \ll 1$; 4 — расчет при стационарной детонации в ПЗ (РАХ-30*) и эталонном заряде (LX-14) размером $\varnothing 40 \times 40 \text{ мм}$ и 4 мм толщине метаемой пластины

В качестве «эталонного» заряда использовалась таблетка, состоящая из прессованного до плотности $1,65 \text{ г/см}^3$ гексогена, флегматизированного 5%-ной добавкой церезинового связующего (ГФ), и тонкого «сенсibiliзирующего» слоя в торцевой части, обращенной к дюралюминиевому ударнику, из высокочувствительного ВВ «фурозанового ряда». За «эталонное» было принято инициирование сенсibiliзированной таблетки ударом со скоростью соударения $W_s = 1,55 \text{ км/с}$, при которой начальное давление инициирующей ударной волны p_0 равно $7,7 \text{ ГПа}$. При этом практически по всему заряду распространяется стационарная детонация. На этом же рисунке приведена усредненная шкала времени для экспериментальных зависимостей (кривая 4 — результат расчета). Приблизительность делений обусловлена различием зависимостей $W(X)$ для разных ВВ и условий инициирования. Особенность конструкции реостатных датчиков перемещения метаемой пластины, использованных в опытах, приводила к надежному сигналу лишь при $X \geq 0,07$. В экспериментах находилась также относительная глубина возникновения детонации $X_{SDT} = x_{SDT} / h_c$. Значение x_{SDT} определяется как путь, на котором производная скорости фронта по времени достигает максимума. Метод, примененный для экспериментального нахождения x_{SDT} , позволяет рассматривать значение величины $0 \leq (1 - x_{SDT} / h_c) \leq 1$ лишь как верхнюю оценку той доли заряда, по которой распространяется стационарная детонация.

При начальном давлении инициирующей ударной волны, входящей в заряд, равном $p_0 = 3,4 \text{ ГПа}$, 20%-ная добавка порошка частиц алюминия диаметром 30 мкм в состоянии поставки к ГФ существенно уменьшает количество энергии, передаваемой от продуктов реакции заряда на разгон медной пластины. Это следует из сопоставления кривых 1 и 2 и объясняется тем, что добавка алюминия приводит к сокращению доли энергоемкости взрывчатого состава, определяемой вкладом от реакции ГФ. Это сокращение в условиях получения кривой 1 не компенсируется тепловыделением от окисления алюминия продуктами разложения (ПР) ГФ. Недостаток тепловыделения от добавки алюминия (а возможно, и его отсутствие) объясняются замедленным образованием ПР ГФ, которые необходимы для зажигания и затем для сгорания частиц алюминия. Ухудшение условий зажигания частиц добавки или даже предотвращение зажигания связано не только с медленным образованием ПР ГФ, но и со сравнительно низкой температурой этих продуктов (относительно «детонационных» значений), а также с низкой скоростью «обдува» частиц, который необходим для освобождения поверхности алюминия от окисной пленки.

Положение кривой 2* для октогена флегматизированного (ОФ) относительно линии 2 в значительной мере объясняется тем, что его пористость равна 8 % против 4 % у ГФ. Понижение начальной пористости с 8 % до 4 % у прессованных зарядов еще не сопровождается сильным деформированием и растрескиванием зерен ВВ и поэтому приводит к снижению ударно-волновой чувствительности. Такие изменения начальной структуры заряда при одинаковых начальных давлениях инициирующей ударной волны (ИУВ) влияют на скорость очагового разложения сильнее, чем различия энергетических характеристик ГФ и ОФ. На это указывают зарегистрированные характеристики эволюции ИУВ — X_{SDT} . В случае заряда ОФ (линия 2*) $S_{SDT} = 0,7$, т. е. ударная волна успевает перейти в детонационную волну, и приблизительно третья часть заряда, обращенная к метаемой пластине, детонирует практически в режиме Чепмена — Жуге (CJ). В случае ГФ (кривая 2) на всем пути следования ИУВ не успевает перерасти в детонацию со скоростью D_{CJ} ($X_{SDT} > 1$) и поэтому заряд претерпевает замедленное разложение, а пластина испытывает существенно меньшие давления и медленнее набирает скорость.

При начальном давлении инициирующей ударной волны, входящей в заряд, равном $p_0 = 7,7$ ГПа, добавка алюминия приводит к характерной зависимости $E = E(X)$, изображенной линией 3. При данном давлении начального импульса интенсивность разложения ГФ обеспечивает такое нарастание давления и количества горячих газообразных продуктов реакции за фронтом ИУВ, которое приводит к быстрому зажиганию и сгоранию значительной доли алюминиевой добавки за время, не превышающее период регистрации процесса. Форма кривой 3 косвенно свидетельствует о снижении (относительно идеально детонирующего заряда ГФ без добавок алюминия) начальных давлений продуктов детонации на разгоняемую пластину $p(t)$ и о нарастающем влиянии окисления алюминия на скорость $W(t)$ метаемой пластины. Оно проявляется в увеличении конечной скорости метания сверх значений, характерных для зарядов ГФ без добавок алюминия (в увеличении E сверх единицы для кривой 3 или превышения скоростей пластины, метаемой с торца заряда ГФ + 20 % Al при начальном давлении ИУВ 7,7 ГПа, над скоростями пластины, метаемой с торца эталонного заряда ГФ с сенсibilизатором без добавок Al при том же начальном давлении ИУВ 7,7 ГПа) в течение порядка пяти микросекунд (5 мкс). Положение линии 3 в плоскости $E-X$ согласуется с результатами экспериментов и представлений о процессах, изложенных в [7, 8]. Однако в этих работах рассматривались процессы, протекающие при метании металлических пластин (и оболочек) в случае распространения по зарядам алюминизированных ГФ

или ОФ стационарной установившейся детонации. Заметим, что снижение скорости и давления детонации p_{CJ} , происходящее под влиянием добавок алюминия к мощным бризантным взрывчатым составам ГФ и ОФ и проявляющееся в снижении скорости метаемой пластины на начальной стадии ее разгона, может быть объяснено и рассчитано различным образом. Графики 1, 2, 2* зависимостей $E = E(X)$ и значения характеристики эволюции ИУВ X_{SDT} , им соответствующих, свидетельствуют о том, что наблюдалось существенное замедление конечного тепловыделения в сравнении с режимом идеальной детонации.

Для более подробного рассмотрения влияния начальных параметров ударно-волнового воздействия на метаемую пластину и времени завершения тепловыделения на количество энергии, реализуемое в виде кинетической энергии метаемой пластины, мы воспользовались результатами математического моделирования торцевого метания пластин зарядами с учетом двух типов превращений ВВ в конечные ПР. Превращения первого типа характеризуются началом реакции на фронте ударной волны (даже сравнительно малой ее интенсивности) и монотонным нарастанием степени разложения исходного ВВ, при котором можно не выделять начало протекания некоторых вторичных реакций с дополнительным тепловыделением. Для второго типа превращений ВВ в конечные продукты взрыва характерно проявление вторичных сравнительно медленных экзотермических реакций, которые начинаются при достаточно большом тепловыделении, сопровождавшем предшествующее, первичное разложение ВВ, происходившее с существенно или даже несоизмеримо большей скоростью.

Моделирование процесса с реакциями первого типа проводилось с использованием характеристики модельного вещества, похожего на ГФ плотностью $1,65 \text{ г/см}^3$, в плоско-симметричном приближении течения, соответствующего схеме на рис. 1, а. При этом ПР описывались с использованием тех же параметров уравнения состояния Беккера — Кистяковского — Вильсона (ВКВ), что при извлечении кинетики разложения ГФ методом квазитонких, или гомобарических, слоев [9]. Процесс разложения ГФ описывался системой уравнений формальной кинетики, отражающей особенности динамики скорости очагового горения и удельной поверхности горения [9]. Закон изменения удельной поверхности горения связан со значением параметра микроструктуры заряда \bar{a}_0 , который в первом приближении может рассматриваться как средний размер зерен поликристаллического ВВ. Особенности разложения ГФ, описываемые в этой модели, очень похожи на те, что рассматриваются в формальной кинетике «инициирования и роста» [9]. Значение \bar{a}_0 , по порядку

совпадавшее с шириной «химпика» стационарной детонации, принималось за простейшую характеристику реакционной способности ВВ при детонационных и детонационно-подобных процессах.

При каждом значении \bar{a}_0 отмечалась скорость, которую можно было принять за конечную скорость метания пластины W_e , и момент времени достижения этой скорости t_e . Для этого момента времени находилась осредненная степень разложения заряда:

$$\bar{m} = \int_0^{h_c} \bar{m}(h, t_e) dh / h_c.$$

Эта величина принималась как характеристика полноты тепловыделения во всем заряде:

$$\bar{m} = 1 - \Delta Q / Q,$$

где Q — количество теплоты, которое может выделиться при полностью завершенном идеальном детонационном превращении; ΔQ — количество теплоты, которое не успевает выделиться во всем заряде ВВ к моменту времени t_e . Значение величины $\Delta Q / Q$ является характеристикой незавершенности тепловыделения в заряде или характеристикой потери тепловыделения к моменту t_e .

Для каждого значения W_e находилось значение конечной относительной кинетической энергии $E_e = (W_e / W_{eb})^2$, где W_{eb} — конечная скорость пластины при идеальном, или «эталонном» инициировании и распространении детонации с постоянной скоростью детонации D_{CJ} . Такой «эталонный» режим в расчетах получался при использовании очень малых значений \bar{a}_0 , при которых детонация с постоянной идеальной скоростью начиналась практически на плоскости удара дюралюминиевой пластинкой-инициатором. При каждом значении \bar{a}_0 находилось не только значение W_e (и соответственно E_e), но и значение начального давления на поверхности контакта метаемой пластины с зарядом ВВ в момент отражения от нее фронта ИУВ p_1 или ударного фронта успевающей сформироваться детонационной волны p_{1i} . С использованием значений этих величин находилась относительная характеристика начального давления на метаемую пластину $P_1 = p_1 / p_{1i}$.

Изменение характеристик эволюции ИУВ, влияющих как на показатель незавершенности тепловыделения, так и на характеристики метательного действия E_e и P_1 , осуществлялось изменением параметра \bar{a}_0 , заданием различных значений скоростей удара W_s дюр-

алюминиевыми пластинами различных толщин. Варьировались также значения «массово-геометрической» характеристики K_{wd} . Эта величина равна отношению произведений плотности материалов и толщин пластин 2 и 4 (см. рис. 1): $K_{wd} = \rho_2 \delta_2 / \rho_4 \delta_4$. Чем больше значение этой характеристики, тем больше схема метания открыта для истечения ПР и энергии заряда в направлении (направлениях), не совпадающем с желательным или требуемым движением метаемой пластины. Величину K_{wd} будем называть «параметром открытости» схемы взрывного метания.

Согласно результатам, полученным при $h_c = 5$ мм, (рис. 3) можно сделать следующие выводы.

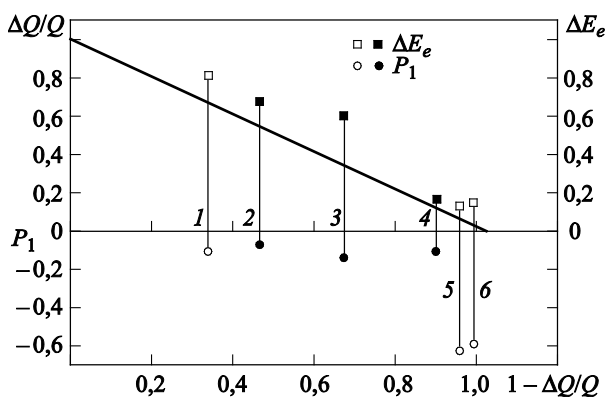


Рис. 3. Относительные потери тепловыделения, кинетической энергии и ослабление начального ударно-волнового воздействия на метаемую пластину при разложении ВВ за фронтом ИУВ:

1 — $K_{wd} = 4$; $a_0 = 0,4$ мм; $W_s = 0,7$ км/с; 2 — $K_{wd} = 1$; $a_0 = 0,7$ мм; $W_s = 0,3$ км/с; 3 — $K_{wd} = 1$; $a_0 = 0,4$ мм; $W_s = 0,3$ км/с; 4 — $K_{wd} = 1$; $a_0 = 0,7$ мм; $W_s = 0,7$ км/с; 5 — $K_{wd} = 4$; $a_0 = 1,3$ мм; $W_s = 2,8$ км/с; 6 — $K_{wd} = 4$; $a_0 = 0,13$ мм; $W_s = 0,7$ км/с

Если при сохранении неизменным энергосодержания заряда ВВ производить ухудшение его реакционной способности или ослаблять иницирование заряда, что приводит к задержке во времени полного тепловыделения, то могут появиться снижение начального давления на метаемую пластину ($P_1 = p_1 / p_{li} < 1$), это очевидно, и незавершенность тепловыделения (или дореагирования), характеризуемая величиной $\Delta Q / Q > 0$. Но даже при «незначительном» снижении начального давления на метаемую пластину ($P_1 = p_1 / p_{li} = 0,8...0,9$), когда недореагирование ВВ ($\Delta Q / Q$) практически отсутствует, потери кинетической энергии метаемой пластины ($\Delta E_e = 1 - E_e$) могут остаться

«заметными», т. е. по-прежнему может остаться справедливым соотношение $\Delta Q / Q < \Delta E_e$, и потери в выделении теплоты могут сопровождаться снижением реализации успевшей выделиться энергии в полезную кинетическую энергию метаемой пластины.

При снижении начального давления $P_1 = p_1 / p_{1i}$ появляется тенденция к увеличению потери $\Delta E_e = 1 - E_e$ с ростом значения K_{wd} более единицы. Эта тенденция проявляется независимо от причин снижения $P_1 = p_1 / p_{1i}$: уменьшения начального давления ИУВ p_0 , ухудшения реакционной способности заряда ВВ или совместного влияния этих факторов.

Подобные расчеты, выполненные совместно с Л.Н. Усенковым и И. Горбачевым, при значениях K_{wd} , существенно меньших единицы («закрытые» схемы метания), выявили также возможность увеличения кинетической энергии метаемой пластины при «умеренном» уменьшении реакционной способности ВВ (при увеличении параметра \bar{a}_0 ориентировочно до 0,2 ... 0,4 мм).

Расчеты для зарядов с $h_c = 15$ мм показали еще более сильную зависимость потерь ΔE_e с уменьшением относительного начального давления $P_1 = p_1 / p_{1i}$ (и вызывающего это уменьшение снижение давления на фронте волны, набегающей на метаемую пластину).

Обнаруживаемый даже при отсутствии потерь тепловыделения эффект снижения коэффициента полезного действия заряда может быть обусловлен двумя механизмами. Первый механизм имеет термодинамическую природу. Он может быть объяснен тем, что доля потенциала ВВ, переходящая в работу расширяющихся продуктов реакции (ПР), зависит от отношения давления в момент их образования и начала расширения p_{be} к давлению в конечном расширенном состоянии p_{ee} [6]. Второй механизм снижения коэффициента полезного действия при замедлении процесса разложения ВВ при уменьшении начального давления на начинающей набирать «полезную» кинетическую энергию пластине связан с неравенством плотностей потоков механических энергий $p(t) \times W(t)$ через поверхности контакта ПР с пластинами или элементами оболочек, ускоряемыми в различных направлениях относительно заряда.

Моделирование метания пластин зарядами ВВ с реакциями второго типа, т. е. со вторичными реакциями, сопровождаемыми дополнительным тепловыделением, проведено на примере новых веществ, аналогичных штатным составам на основе октогена или гексогена. Штатные составы традиционно содержат около 20 % алюминиевых добавок и характеризуются пористостью приблизительно 5 %. От «чистых» ВВ без добавок алюминия они отличаются пониженными

параметрами детонации и соответственно параметрами начального воздействия на материал метаемых тел. Но, к сожалению, эти штатные составы характеризуются высокой степенью реализации энергии вторичных реакций в фугасное, но не метательное действие. Практически важным представляется исследование о возможности увеличения с помощью добавок алюминия скорости метания.

Для установления возможности «мягкого» взрывного метания (точнее, «смягченного» высокоскоростного метания) был рассмотрен модельный состав, похожий на низкопористое ВВ РАХ-30. Этот пробный заряд, обозначенный нами как РАХ-30*, так же как и РАХ-30 [10], содержит 85 % (масс.) взрывчатой основы с плотностью 99 % от теоретически максимально возможной плотности (ТМД), которая состоит из 92 % октогена и 8 % двухкомпонентного пластифицированного связующего (3,2 % САВ + 4,8 % ВДНРА/Ф), и 15 % алюминиевых частиц размером порядка 15 мкм. В качестве ВВ «эталонного» заряда было взято соединение LX-14, состоящее из 95,5 % октогена и 4,5 % невзрывчатого термопластичного полиуретанового связующего (Estane). Заметим, что лучшим «эталонным» зарядом для выявления роли алюминия в РАХ-30 был бы заряд из взрывчатой основы РАХ-30 без добавки алюминия. LX-14 из-за невзрывчатого связующего по энергонасыщенности и параметрам детонационного фронта несколько уступает заряду, состоящему только из взрывчатой основы РАХ-30. Это обстоятельство будет учитываться при анализе результатов расчетов.

В обоих зарядах на основе октогена моделировалось распространение стационарных режимов с параметрами детонационного фронта: скорость D_{CJ} и давление детонации p_{CJ} , которые наряду с начальными плотностями зарядов ρ_0 приведены в таблице.

Таблица

ВВ	ρ_0 , г/см ³	D_{CJ} , км/с	p_{CJ} , ГПа	$e_{6,5}$, МДж/кг	e_{tot} , МДж/кг
LX-14	1,835	8,8	37	4,7	$\leq 5,6$
РАХ-30	1,885	8,16	31,3	5,1	6,83

В этой таблице даны также значения энергии (удельной), выделяющейся при расширении продуктов детонации в 65 раз (Expansion Energy) $e_{6,5}$ и при «неограниченном» расширении e_{tot} . Все взрывные характеристики РАХ-30 получены в результате расчетов по термохимическому коду [10, 11].

Согласно современным экспериментальным данным, при плотности зарядов твердых ВВ, приближающейся к ТМД, ширина химика и время разложения органического ВВ в нем становятся исчезающе малыми. За время пребывания в этой зоне частицы алюминиевой до-

бавки не успевают претерпеть существенное обгорание с поверхности под действием ПР взрывчатой основы заряда. Поэтому разложение РАХ-30*, взрывчатая органическая основа которого имеет плотность, практически равную ТМД, описывается в рамках модели детонации с догоранием. Предполагается очень быстрое разложение взрывчатой основы заряда и образование смеси ее ПР с частицами практически непрореагировавшего алюминия, параметры состояния которой находятся в соответствии с моделью детонации Чепмена-Жуге. «Прохождение через» алюминиевую частицу чрезвычайно узкого ударного фронта и фронта высокоскоростного потока образовавшихся высокотемпературных и очень вязких ПР, по-видимому, может привести к освобождению существенной части поверхности частицы от оксидной пленки. Это «обстоятельство» дает основание считать, что в зарядах со структурой, как у РАХ-30, частицы алюминия вблизи фронта детонации претерпевают интенсивное обгорание в обдувающих их ПР взрывчатой основы. По мере выравнивания скоростей частицы и ПР замедляется горение алюминия вследствие диффузионных затруднений и падения концентрации окислителя в ПР.

Дополнительное тепловыделение от горения алюминия может привести к «нарастанию детонации» и формированию «новой» поверхности Чепмена — Жуге. Но мы полагаем, что дополнительное тепловыделение происходит недостаточно быстро для того, чтобы сильно влиять на параметры фронта на относительно малом пути его движения по заряду.

Для реагирующей смеси продуктов детонации органической основы заряда и догорающего алюминия использовались удобные при компьютерном моделировании уравнения состояния и кинетики [12]:

$$p = p_{\lambda=0}(V) + \frac{\omega}{V} \lambda Q_{Al}; \quad \frac{d\lambda}{dt} = \frac{6n_0}{d_0} p^{0,3} (1-\lambda)^{2/3} \left(1 - \frac{C}{C_{\max}} \lambda \right).$$

В этих выражениях: первое слагаемое — функция $p_{\lambda=0}(V)$ — имеет ту же форму, что и каноническое уравнение Джонса — Уилкинса — Ли (*JWL*); λ — степень полноты сгорания алюминиевых частиц с начальным размером d_0 ; C — массовая доля алюминия в данном составе ВВ; C_{\max} — максимальная массовая доля алюминия, который может сгореть только за счет продуктов детонации органической основы данного состава ВВ; Q_{Al} — дополнительный компонент удельной внутренней энергии продуктов детонации, обусловленный сгоранием алюминия; V — удельный объем продуктов детонации (отнесенный к объему заряда ВВ в исходном состоянии); ω — параметр Грюнайзена; n_0 — настроечный параметр.

Значения параметров функции $p_{\lambda=0}(V)$ и приведенных уравнений, а также метод их нахождения, содержатся в [12]. При этих значениях параметров расчетные скорости расширения медной оболочки W с начальными внутренним диаметром 254 мм и толщиной 254 мм (рис. 4) превышают экспериментальные данные для РАХ-30 [11] в среднем на 2 %. Результаты расчетов с использованием этих параметров можно рассматривать как оценки скоростей «мягкого» высокоскоростного метания при использовании некоторого модельного ВВ, метательная способность которого является предельно высокой для составов, аналогичных РАХ-30.

На рис. 4 показана также зависимость отношения кинетических энергий (квадрата отношения скоростей метания) оболочек, разгоняемых продуктами детонации ВВ РАХ-30* и LX-14 от степени расширения продуктов детонации. В качестве «эталонного» принят заряд LX-14, $E = (W_{\text{РАХ}} / W_{\text{LX}})^2$.

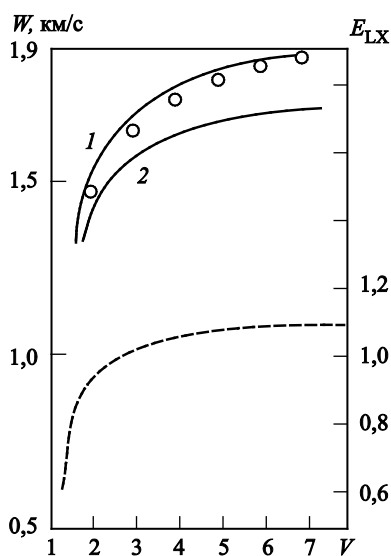


Рис. 4. Радиальные составляющие скорости расширения медной трубки, заполненной РАХ-30, и влияние степени расширения ПР V на относительную кинетическую энергию оболочки («эталонное» ВВ LX-14):

1 — расчет с УРС и кинетикой тепловыделения настоящей работы; 2 — расчет с УРС настоящей работы при условии отсутствия окисления добавки алюминия; 3 — экспериментальные данные [11]; 4 — расчетная относительная кинетическая энергия для пробного заряда РАХ-30*

Полученные значения показателей влияния добавки алюминия на скорость радиального метания ($E = 1,085$ при $V = 6,5$ и $E \approx 1,1$ при $V = 8$) превышают типичные значения показателя влияния добавок алюминия ($E \approx 1,05$) на метательную способность штатных зарядов флегматизированных гексогена и октогена (сравнительно высокой пористости). Это объясняется в основном тем, что в качестве эталонного заряда взят LX-14, который содержит 5 % невзрывчатого связующего. Заметим, что сравнение РАХ-30 или РАХ-30* с LX-14 в настоящее время имеет практический смысл.

График 4 (см. рис. 2) зависимости $E = (W_{\text{РАХ}} / W_{\text{LХ}})^2$ от пути разгона, аналогичен кривой 4 на рис. 4 для радиального метания цилиндрической оболочки, получен в результате расчета метания медного диска толщиной 4 мм с торца зарядов диаметром и высотой 40 мм. Принятая схема метания является приближенной моделью стандартной пробы М40 для определения метательной способности индивидуальных ВВ и взрывчатых составов, в которой метается, однако, стальная, а не медная пластина. Так же как и при метании цилиндрической оболочки и при метании медной облицовки снарядоформирующего заряда, которое будет рассмотрено далее, расчет проводился с использованием гидрокода RUSS-2DE. При описании материалов корпуса (стальной «трубы»), в канале которого осуществляется взрыв и метание, и метаемого диска используются представления об упругопластических сжимаемых средах с динамическим пределом текучести, вычисляемым по соотношениям Джонсона — Кука и Зерилли — Армстронга, соответственно. Расчет, по результатам которого построен график 4 (см. рис. 2), при $X = x / h_c = 1$ дает значение E , равное 1,13.

Это число превышает значение показателя влияния добавок алюминия на метательную способность флегматизированных гексогена и октогена приблизительно на 6 %. Отмеченное различие, а также расхождение линий 4 и 3 на рис. 2 можно связать с рядом причин. К таковым относится то, что в качестве эталонного заряда для расчетной оценки влияния добавки алюминия на скорость метания (кривая 4) выбрано недостаточно энергоемкое (относительно основы РАХ-30) вещество LX-14. Кроме того, в составе РАХ-30 и алюминизированного ГФ неодинаковое массовое содержание частиц алюминия (15% и 20% соответственно), имеющих разные размеры. Другая причина связана с использованием в нашем эксперименте (проведенным совместно с В.В. Зюзиным) более пористых зарядов ГФ и алюминиевых частиц большего размера, что ухудшает эффективное разрушение и обдирку оксидной пленки на частице добавки. Также нельзя исключать проявления вблизи поверхности инициирования эффектов, обусловленных эволюцией ИУВ в зарядах алюминизированного ГФ и связанным с ней изменением состава смеси ПР и исходного ВВ.

Полученное в расчетах значение показателя (1,13) влияния добавки алюминия на скорость торцевого метания достаточно близко к значению аналогичного показателя при радиальном метании ($\approx 1,1$) при $V = 8$. Заметим, что в работах со сравнительно «низкоплотными» флегматизированными гексогеном или октогеном [8] наблюдается более заметный эффект от добавления алюминия при торцевом метании в сравнении с радиальным метанием.

Возможность улучшения метательного действия снарядоформирующих зарядов добавками алюминия. Безусловно, что

практический интерес в большей мере представляет метательное действие зарядов неидеально детонирующих бризантных ВВ не в условиях, близких к стандартизированным методикам испытаний, а при более сложных неоднородных течениях, реализуемых при функционировании конкретных конструкций взрывных устройств. Большой интерес представляют процессы, возникающие на стадии формирования из кумулятивных облицовок (КО) или оболочек снарядоформирующих зарядов (СФЗ) ударников, называемых удлиненными поражающими элементами (см. рис. 1, б). Они предназначены для пробития прочных металлических преград, удаленных на расстояния, в десятки и сотни раз превышающие диаметры зарядов.

Мы предполагаем, что снижение давления начального воздействия детонационной волны на метаемую оболочку приводит к уменьшению поврежденности структуры металла и поэтому способствует предотвращению нежелательного снижения массы окончательно сформированного ударника, которое происходит из-за разрушения металла на стадии инерционного движения элементов КО уже практически без влияния ПР заряда. Поэтому в условиях функционирования СФЗ аналогом конечной скорости метаемой пластины (или скорости расширения трубки) считаем скорость удлиненного ударника в конце стадии его формирования. При этом аналогом необходимой степени ослабления начального давления на метаемую пластину или оболочку можно считать следующее условие: сохранение сплошности материала сформированного элемента, принявшего форму, которая обеспечивает требуемую пробивную способность.

Исходя из анализа проявления влияния добавок дисперсного алюминия на метательное действие зарядов ВВ при торцевом метании, можно предположить возможность совершенствования взрывного формирования высокоскоростных удлиненных ударников СФЗ путем использования вместо высокобризантных составов, аналогичных LX-14, алюминизированных ВВ, сходных с PAX-30 или с модельным ВВ PAX-30*. Для обоснования такой возможности было проведено математическое моделирование функционирования прототипа СФЗ в течение времени формирования удлиненного ударника — приблизительно 300 мкс.

Схема взрывного устройства (см. рис. 1, б) и геометрические параметры модельного заряда ВВ при различных вариантах расчетов выбраны такими: h_c и d_c неизменны и приблизительно такие же, как у германского прототипа SMarT-155 (Sensor-fuzed Munitions for Artillery 155 mm), за исключением радиуса R_{cs} сферической КО постоянной толщины $\delta_{cs} = 2,5$ мм, диаметр d_{cs} основания которой принимался также неизменным ($d_{cs} = d_c = 127$ мм).

Выполняя серию расчетов с возрастающими значениями радиуса КО при обоих ВВ разрывного заряда, находили значение R_{cs} , при котором формирование удлиненного ударника проходило уже практически без нарушения сплошности материала и тот приобретал форму, необходимую для пробития преграды. При увеличении радиуса сверх этого значения, названного нами оптимальным, деформирование КО может сопровождаться разрушением металла и значительным снижением массы окончательно сформированного ударника. Для таких отличающихся друг от друга значениях оптимальных радиусов КО приведено сопоставление результатов расчетов. В случае использования заряда LX-14 оптимальным оказался радиус, равный 110 мм, а при заряде PAX-30* — радиус, равный 95 мм (рис. 5).

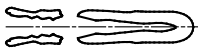

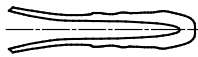
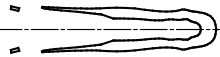
Взрывчатое вещество	
LX-14	PAX-30*
$R_{cs} = 105 \text{ мм}$ 	$R_{cs} = 90 \text{ мм}$ 
$R_{cs} = 110 \text{ мм}$ 	$R_{cs} = 95 \text{ мм}$ 

Рис. 5. Влияние состава заряда ВВ на состояние материала КО через 250 мкс после начала движения ее осевых элементов

Сопоставление результатов (сравнение скоростей метания или кинетических энергий сформированных поражающих элементов) при равных значениях радиусов КО было бы лишено практического смысла из-за разрушения одного из них.

На рис. 6 представлены зависимости от времени осевой составляющей скорости W_x точек окружностей на поверхности медной КО, имеющих начальные радиусы r , равные 2 мм, 20 мм и 45 мм. Начальные части зависимостей осевых составляющих скорости (начиная с $W_x = 0$) были бы плохо различимы на рисунке.

Поэтому начальная часть зависимости $W_x(t)$ показана только для точек КО с $r = 2$ мм. Скорости удлиненных ударников, окончательно формирующихся при оптимальных значениях R приблизительно на 300-й микросекунде, равны 2899 м/с (при метании зарядом LX-14) и 3140 м/с (при метании зарядом PAX-30*). С учетом увеличения массы КО в 1,043 раза при замене LX-14 на PAX-30* и сопутствующей ей оптимизации искривленности КО получаем значение относительной кинетической энергии ударника, метаемого СФЗ: $E_{\text{PAX/LX}}^{\text{СФЗ}} = 1,22$. Переход к оптимальному радиусу КО при сохранении значения h_c приводит

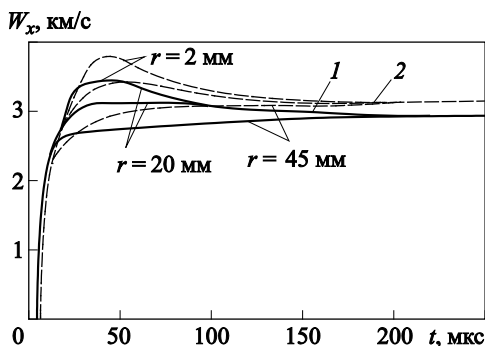


Рис. 6. Динамика осевой составляющей скорости элементов КО, первоначально удаленных от оси симметрии на расстояния 2 мм, 20 мм и 45 мм:
1 — заряд LX-14, $R_{CS} = 110$ мм; 2 — заряд PAX-30*,
 $R_{CS} = 95$ мм

к возрастанию массы заряда на 2,6 %. Значение показателя проявления добавки дисперсного алюминия при замене LX-14 на PAX-30*, приведенное к условию равенства масс зарядов, т. е. «освобожденное» от влияния массы ВВ следует считать уменьшенным на 2,6 % и равным $E_{PAX/LX} = 1,19$. В то же время, замена LX-14 на PAX-30* приводит к увеличению показателя $e_{6,5}$ на 8,5 %, а удельного энерговыделения при полном расширении продуктов взрыва e_{tot}^* — на 22 %.

Выводы. При снижении начального давления ПВ на метаемую пластину или оболочку даже при завершеном тепловыделении во всем заряде проявляется тенденция ухудшения реализации потенциала ВВ в метательное действие заряда при увеличении степени «открытости» схемы метания. Увеличение пути, пройденного ИУВ до метаемого тела, усиливает эту тенденцию.

Режимы детонации с догоранием добавок алюминия к таким мощным бризантным ВВ, как октоген, при их плотности, приближающейся к ТМД, в большей степени удовлетворяют стремлению реализовать повышенное энергосодержание зарядов ВВ в их метательное действие с пониженными начальными давлениями ПВ на метаемые оболочки и с повышенными конечными кинетическими энергиями разгоняемых оболочек.

Результаты испытаний ВВ стандартными методами (ускорение 4 мм пластин и расширение медной оболочки) позволяют только в первом приближении дать оценку эффективности модификации взрывчатого состава с позиции требований улучшения метательного действия заряда в составе конкретной конструкции взрывного устройства.

Результаты математического моделирования начальной стадии функционирования СФЗ дают основание прогнозировать увеличение кинетической энергии ударника, сформированного из КО без нарушения сплошности материала, приблизительно на 20 % при замене штатных зарядов на основе октогена низко пористыми композициями, сходными с РАХ-30 по составу, пористости и массовому содержанию (15 %) частиц алюминия размером 15 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Махов М.Н. Энергосодержание смесей CL-20 с алюминием. Фролов С.М., ред. *Горение и взрыв*. Москва, Торус пресс, 2013, вып. 6, с. 293–296.
- [2] Охитин В.Н., Меньшаков С.С. Влияние точки инициирования на параметры взрыва цилиндрического заряда на жесткой поверхности. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 1. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/561.html> (дата обращения 30.05.2015).
- [3] Куликов В.Н., Осавчук А.Н., Имховик Р.А., Одинцов В.А. Детонационные характеристики и метательно-дробящее действие многокомпонентных взрывчатых составов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 1. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/564.html> (дата обращения 30.05.2015).
- [4] Яшин В.Б., Алексеев В.В., Ходырев С.П., Малкин А.В., Имховик А.Н., Селиванов В.В., Симонов А.К. Параметры взрыва зарядов тротила, содержащих блоки из высокоплотных металлофторопластовых композиций. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 1. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/566.html> (дата обращения 30.05.2015).
- [5] Андреев С.Г., Бойко М.М., Клименко В.Ю. Возможность компьютерного моделирования функционирования снарядоформирующих зарядов с алюминизированными взрывчатыми веществами при разработке прототипов боеприпасов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 1. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/568.html> (дата обращения 30.05.2015).
- [6] Андреев С.Г., Шестаков М.А. Оценка работоспособности высокоплотных взрывчатых веществ с использованием уравнения состояния JWL. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 7. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mlgp/1401.html> (дата обращения 30.01.2016).
- [7] Давыдов В.Ю., Гришкин А.М., Мурышев Е.Ю. Влияние газодинамических условий на степень реализации энергии вторичных реакций в метательное действие ВВ. *Физика горения и взрыва*, 1993, т. 29, № 2, с. 109–115.
- [8] Гоголя М.Ф., Бражников М.А., Махов М.Н., Долгобородов А.Ю., Любимов А.Е., Соколова И.Л. Влияние алюминия на метательную способность смесевых составов на основе штатных взрывчатых веществ. *Химическая физика*, 2012, т. 31, № 11, с. 33–47.
- [9] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*: в 2 т. Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2002, т. 1, 824 с.
- [10] Balas W., Nicolich S., Capellos C., Hatch R. and Braithwaite P. New Aluminized Explosives for High Energy – High Blast (Combined Effects) Warhead Applications. *2006 IM/EM Symposium*. Bristol, UK, 2006. URL: http://www.imemg.org/res/imemts2006_Hatch_1.ppt.pdf

- [11] Baker E.L., Balas W., Stiel L.I., Capellos C., Pincay J. Theory and Detonation Products Equations of State for a New Generation of Combined Effects Explosives. *2007 Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium*. Miami, USA, 2007. www.dtic.mil/ndia/2007im_em/BBriefs/4Baker.pdf
- [12] Клименко В.Ю. Алюминизированные ВВ: Физика детонации и численная модель детонации. *Международ. конф. «Ударные волны в конденсированных средах»*. Киев, Украина. Интерпресс ЛТД, 2012, с. 135–143.

Статья поступила в редакцию 10.03.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Андреев С.Г., Бойко М.М., Клименко В.Ю. Метательное действие зарядов взрывчатых веществ при распространении инициирующих и детонационных волн. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 4.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mlgp/1483.html>

DOI 10.18698/2308-6033-2016-04-1483

Андреев Сергей Григорьевич родился в 1944 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1969 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана, член-корреспондент Российской академии естественных наук. Область научных интересов: физика процессов горения и взрыва. e-mail: andreeff2007@mail.ru

Бойко Михаил Михайлович родился в 1946 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1970 г. Ст. научный сотрудник, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: физика процессов горения и взрыва. e-mail: sm4-2009@mail.ru

Клименко Владимир Юрьевич родился в 1949 г., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова в 1971 г. Канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник НИИ «Геодезия». Область научных интересов: химическая физика детонационных процессов и компьютерное моделирование ударно-волновых процессов. e-mail: klimenko@center_chph.ras.ru

Explosive charge projectile action during initiating and detonating wave propagation

© S.G. Andreev¹, M.M. Boyko¹, V.Yu. Klimenko²

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

² Research institute Geodesy, Krasnoarmeysk, 119991, Russia

The article deals with the influence of factors (including dispersed aluminium addition presence) causing initial shock wave evolution in the charges of standard explosives on the charge projectile action characteristics. We carry out the mathematical modeling of characteristic features of aluminium addition to the poor-porous charges in the acceleration effect under the conditions of normal methods of defining the projectile ability as well as under the conditions of shell-forming charges operation. The study shows a possibility of improving the acceleration effect of the shell-forming charges when the standard explosives are replaced by poor-porous aluminum-backed composition such as PAX-30.

Keywords: explosive acceleration, initial shock wave, detonation, secondary reaction, aluminium.

REFERENCES

- [1] Makhov M.N. *Gorenie i vzryv — Combustion and explosion*. Moscow, Torus press Publ., 2013, no. 6, pp. 293–296.
- [2] Okhitin V.N., Menshakov S.S. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 1. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/561.html>
- [3] Kulikov V.N., Osavchuk A.N., Imkhovik R.A., Odintsov V.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 1. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/564.html>
- [4] Yashin V.B., Alekseyev V.V., Khodyrev S.P., Malkin A.V., Imkhovik A.N., Selivanov V.V., Simonov A.K. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 1. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/566.html>
- [5] Andreyev S.G., Boyko M.M., Klimenko V.Yu. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 1. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/blasting/568.html>
- [6] Andreyev S.G., Shestakov M.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2015, no. 7. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mlgp/1401.html>
- [7] Davydov V.Yu., Grishkin A.M., Muryshhev E.Yu. *Fizika goreniya i vzryva — Physics of Combustion and Explosion*, 1993, vol. 29, no 2, pp. 109–115.
- [8] Gogulya M.F., Brazhnikov M.A., Makhov M.N., Dolgoborodov A.Yu., Lyubimov A.E., Sokolova I.L. *Khimicheskaya fizika — Chemical physics*, 2012, vol. 31, no. 11, pp. 33–47.
- [9] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva [Physics of explosion]*. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2002, vol. 1, 824 p.
- [10] Balas W., Nicolich S., Capellos C., Hatch R. and Braithwaite P2006 *IM/EM Symposium*. Bristol, UK, 2006. Available at: http://www.imemg.org/res/imemts2006_Hatch_1.ppt.pdf
- [11] Baker E.L., Balas W., Stiel L.I., Capellos C., Pincay J. Theory and Detonation Products Equations of State for a New Generation of Combined Effects

Explosives. 2007 *Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium*. Miami, USA, 2007. Available at: www.dtic.mil/ndia/2007im_em/BBriefs/4Baker.pdf

- [12] Klimenko V.Yu. *Mezhdunarodnaya konferentsiya. Udarniye volny v kondensirovannikh sredakh — International conference. Shock waves in condensed medium*. Kiev, Ukraina, Interpress LTD Publ., 2012, pp.135–143.

Andreev S.G. (b.1944) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of the Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences. Author of more than 100 publications in the field of physics of processes of combustion and explosion. e-mail: andreeff2007@mail.ru

Boyko M.M. (b.1946) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1970. Assoc. Professor of the Department of High-Precision Airborne Devices, Senior Research Scientist, Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of physics of processes of combustion and explosion. e-mail: sm4-2009@mail.ru

Klimenko V.Yu. (b.1949) graduated from Lomonosov Moscow State University in 1971. Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Research institute Geodesy. Author of more than 100 publications in the field of chemical physics of detonation processes and computer simulation of shock wave processes. e-mail: klimenko@center_chph.ras.ru