

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 662.215.5

ИНИЦИИРОВАНИЕ УДАРОМ СМЕСЕЙ ОКФОЛА-3,5 С АЛЮМИНИЕМ

© 2021 г. А. В. Дубовик*

Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: a-dubovik@mail.ru

Поступила в редакцию 09.11.2020;
после доработки 09.12.2020;
принята в печать 21.12.2020

Приведены экспериментальные данные по чувствительности к удару, характеризуемой критическими давлениями инициирования взрыва, зарядов из смеси окфола-3,5 с частицами алюминия дисперсностью от 0.1 до 160 мкм во всем диапазоне изменения концентраций компонентов. Отмечено постоянство давлений возбуждения взрыва от размера микрочастиц металла при содержании последнего в смеси $0.1 < \alpha < 0.7$ и наночастиц при $0.4 < \alpha < 0.7$. Анализ различных моделей трения показал, что полученные результаты можно объяснить с использованием модели фрикционного разогрева частиц при сухом трении с пластическим износом в потоке разлетающихся фрагментов во время разрушения заряда взрывчатых веществ при ударе. Приведены дополнительные сведения, уточняющие предложенные ранее формулировки механизма инициирования взрыва композиционных взрывчатых веществ.

Ключевые слова: взрывчатые вещества, удар, взрыв, чувствительность, трение, износ.

DOI: 10.31857/S0207401X21080021

ВВЕДЕНИЕ

Для повышения метательных или баллистических характеристик взрывчатых веществ (ВВ) в них вводят активные твердые компоненты – металлы, оксиды и гидриды металлов и пр. [1–3]. При этом особое внимание обращается на гранулометрический состав порошков, так как от него зависят возможность и эффективность участия металлизированных компонентов в реакциях химического взаимодействия с продуктами взрывчатого превращения базового вещества смесей. Однако твердые компоненты могут сильно понизить уровень безопасности работы с полученными смесями [4, 5]. Влияние дисперсного состава порошков на чувствительность смесей к механическим воздействиям представляется, как и в случаях горения и детонации смесей, весьма значительным.

Впервые систематические исследования влияния размера твердых частиц на чувствительность ВВ выполнены В.А. Теселкиным в работе [6] на примере смесей октогена с алюминием. В своих опытах он использовал оригинальную методику, которую нельзя назвать динамическим испытанием на удар или быстрый сдвиг. Ее можно квалифицировать как квазистатическое испытание на быстрое разрушение сосуда с ВВ под высоким давлением. В результате разрыва стенок сосуда (оболочки), который происходит при некотором

внутреннем давлении P , фрагменты разрушений оболочки и заряда ВВ истекают с высокой скоростью, инициируя взрыв. Инструментальные измерения состояния растекающегося ВВ (скоростей потоков, режима спада давления и др.), координаты места и момента времени возникновения взрыва не проводились.

В работе [6] был получен ряд интересных результатов, в частности о независимости критического давления инициирования $P_{кр}$ смеси октогена с Al состава 80/20 от размера d частиц алюминия в диапазоне $d = 1–150$ мкм. При $d < 1$ мкм наблюдалось резкое падение $P_{кр}$ до уровня в полтора раза меньше прежнего. В обоих случаях, больших и малых d , происхождение взрывов объяснялось на основе единого механизма химического взаимодействия алюминия с продуктами распада октогена в очагах взрыва при разрушении зарядов. Такое объяснение представляется неудовлетворительным, поскольку приводит к выводу о том, что существуют два механизма химических взаимодействий, различных для смесей с частицами алюминия микро- и наноразмера. Но и такой вывод не дает ответа на вопрос о причине постоянства $P_{кр}$ в широком диапазоне изменений d .

Это обстоятельство, включая ряд других недостаточно убедительных положений, представленных в [6], а также использование метода исследе-

Таблица 1. Критические давления инициирования (ГПа) смесей окфола-3,5 с порошком алюминия разной дисперсности [7, 8]

α	A(0.1)	A(8)	A(15)	A(160)	$\langle P \rangle$, ГПа	$\pm \Delta \langle P \rangle$, ГПа	P_{ox} , ГПа
0	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.07	0.73
0.1	0.53	0.51	0.49	0.66	0.55	0.08	0.55
0.2	0.50	0.46	0.43	0.63	0.51	0.09	0.50
0.3	0.49	0.53	0.46	0.59	0.53	0.05	0.54
0.4	0.42	0.65	0.56	0.68	0.63	0.05	0.65
0.5	0.44	0.63	0.58	0.58	0.58	0.04	0.62
0.6	0.43	0.57	0.58	0.62	0.59	0.02	0.59
0.7	0.44	0.69	0.67	0.62	0.66	0.03	0.67
0.8	0.55	0.71	0.71	0.67	0.70	0.19	0.86
0.9	0.66	1.47	1.01	0.90	1.13	0.25	1.50

Примечание: $\langle P \rangle$ — средние давления инициирования смесей с микрочастицами, $\pm \Delta \langle P \rangle$ — среднеквадратичные отклонения от $\langle P \rangle$, P_{ox} — давления инициирования смесей с порошком корунда Al_2O_3 .

дований, не допускающего прямого сравнения собственных результатов с многочисленными данными других копровых испытаний [7, 8], открывают возможность для развития начатых в работе [6] исследований влияния размеров твердых частиц на чувствительность металлизированных ВВ к удару. При этом особое внимание должно быть уделено исследованиям всего диапазона концентраций алюминия и выявлению роли различных видов фрикционных процессов в разогреве и инициировании разрушающегося заряда ВВ при ударе.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Определение показателей чувствительности смесей ВВ с твердыми частицами металла проводилось на копре К-44-2 с использованием метода критических давлений [7, 9]. В этом методе применяется тензометрическая методика для регистрации параметров холостого и снаряженного ударов и фотометрическая методика для фиксации момента взрыва при ударе. Объектами исследований были бинарные смеси на основе штатного окфола-3,5 (флегматизированный 3.5% жиросодержащих веществ октоген с размером частиц ≈ 30 мкм; далее по тексту — просто октоген) и алюминия в виде порошка с размером частиц 0.1 мкм — алюминий A(0.1), а также порошков средней дисперсности A(8) и A(15) и крупнодисперсного порошка A(160)¹⁾. Смеси готовились путем простого смешения компонентов на кальке с помощью резиновой пробки в течение 15 мин. Под давлением в 500 МПа из них прессовали заряды в виде дисков диаметром 10 мм и толщиной от 0.1 до 1 мм. Диски помещали между плоскими поверхностями цилиндрических роликов, соосно с которыми

дополнительно устанавливали ролик с тензодатчиком. Полученную сборку устанавливали на основание копра и подвергали осевому удару грузом весом 10 кг с энергией 50 Дж. Сигналы с тензодатчика и фотодиода фиксировались цифровым осциллографом с полосой пропускания 50 МГц и далее обрабатывались на компьютере по специальной программе. Точность определения величины $P_{кр}$ составляла 15%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 представлены полученные ранее [9, 10] результаты по критическим давлениям инициирования исследованных смесей в зависимости от содержания в них алюминия, α , и данные их аналитической обработки. Рассмотрим полученные результаты.

1. Алюминий сенсibiliзирует заряды октогена. Уровень сенсibiliзации, оцениваемый параметром $z = P_{кр}^{окт} / P_{кр}^{см}$, зависит от состава смеси. При $\alpha = 0.2$ максимальная величина $z = 1.40$ и одинакова для всех смесей. При $\alpha > 0.2$ и вплоть до $\alpha = 0.75$ параметр z для смесей с частицами микроразмера составляет 1.17, тогда как для смесей с частицами наноразмера он составляет 1.68.

При $\alpha > 0.8$ и $\alpha > 0.9$ давления $P_{кр}^{см} > P_{кр}^{окт}$ соответственно для смесей с частицами микро- и наноразмера (в этом случае параметр $z < 1$ характеризует уже флегматизацию октогена).

2. В пределах точности измерений значения $P_{кр}$ смесей с микроразмерными частицами Al ($1 < d < 160$ мкм) приблизительно одинаковы для всех значений $\alpha = 0.1-0.7$. В табл. 1 приведены средние для каждого α значения (групповые) давления $\langle P \rangle$ и средние квадраты их отклонений $\Delta \langle P \rangle$.

¹⁾ В скобках указаны размеры частиц Al в мкм.

По ним рассчитаны общее среднее давление $P_b = 0.58$ ГПа и среднеквадратичное отклонение $\Delta_b = 0.05$ ГПа. Они позволяют оценить уровень неизвестного среднего давления инициирования P_x для $\alpha = 0.1-0.7$. Задаваясь надежностью оценки $\gamma = 0.99$, с помощью таблиц t -распределения Стьюдента при имеющейся выборке $n = 7$ определим коэффициент связи $t_\gamma = 3.71$ и рассчитаем доверительный интервал давлений $(P_b - t_\gamma \Delta_b / \sqrt{n}, P_b + t_\gamma \Delta_b / \sqrt{n})$ или $0.51 < P_x < 0.65$, в котором заключено неизвестное среднее давление. На рис. 1 границы доверительного интервала отмечены двумя горизонтальными линиями. Давление инициирования октола-3,5 в него не попадает, а давления его смеси с наночастицами алюминия попадают в него лишь частично (при $0.1 < \alpha < 0.3$).

Полученные данные не только подтверждают выводы работы [6] о независимости давления инициирования от дисперсности микроразмерного алюминия, но существенно дополняют их сведениями о независимости $P_{кр}$ от состава смесей с микрочастицами в диапазоне $0.1 < \alpha < 0.7$. Средний уровень сенсibilизации октогена при давлении P_b составляет $z = 1.26$.

3. На рис. 1 наряду с групповыми давлениями $\langle P \rangle$ приведены критические давления инициирования $P_{кр}$ смесей октола с частицами оксида алюминия микроразмера ($d \approx 30$ мкм). В диапазоне $0.1 < \alpha < 0.7$ $P_{кр}$ полностью совпадают со значениями $\langle P \rangle$ для смесей октогена с алюминием. Полагая, что Al_2O_3 не способен реагировать ни с октогеном, ни с продуктами его термораспада, приходим к выводу, что происхождение таких величин давлений $P_{кр}$ для вышеперечисленных смесей не связано с инициированием взрыва по механизму химического взаимодействия алюминия с продуктами взрывчатого превращения октогена в горячих точках заряда ВВ при ударе. Представляется возможным объяснить их появление, основываясь на гипотезе о воспламенении октогена раскаленными частицами алюминия во время разрушения заряда ВВ ударом. Пиковые разогревы образуются при трении частиц о контактные поверхности ударника (наковальни) во время быстрого (со скоростью ~ 100 м/с [8]) радиального истечения фрагментов разрушающегося заряда. Далее их тепло передается окружающему ВВ, в котором возбуждается быстрая реакция. При этом надо иметь в виду, что уровень фрикционного разогрева частиц сильно зависит от вида трения и особенностей его проявления.

4. При кратковременном ($t < t_f$ — характерное время трения) сухом трении пары тел со скоростью V тепловая волна распространяется от поверхности контакта в глубь тел не далее чем на расстояние $(\chi t_f)^{1/2}$, где $\chi = \lambda / \rho c$ — температуропроводность

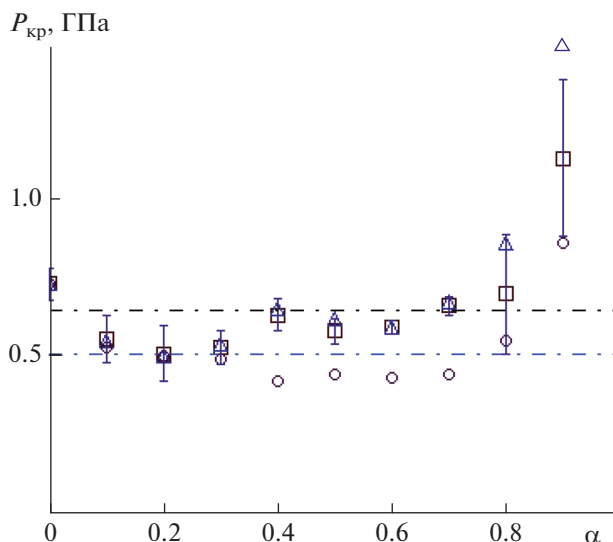


Рис. 1. Зависимость $\langle P \rangle$ от состава смесей и размера твердых частиц: смеси октогена с порошком Al с частицами микро- (□) и наноразмера (○) и с оксидом Al (△).

тела. Приближенное уравнение притока тепла для пробной частицы, помещенной при $t = 0$ в точку x_0 фрикционного контакта, запишется следующим образом:

$$\rho c \frac{dT}{dt} = \frac{2\tau_0 V}{(\chi t)^{1/2}}, \quad T(0) = T_0. \quad (1)$$

Его решение для значений $t = t_0 = x_0 / V \leq t_f$ имеет вид

$$\Delta T = \frac{\tau_0 V}{(\lambda c \rho)^{1/2}} \left(\frac{x_0}{V} \right)^{1/2}; \quad (2)$$

здесь τ_0 — предел прочности тела на сдвиг. Как следует из (2), подъем температуры ΔT вследствие трения равен нулю на передней кромке частицы (при $x_0 = 0$) и достигает максимума ΔT_m на ее задней кромке ($x_0 = d$). Отсюда следует, что при сухом трении частиц твердого компонента взрывчатой смеси результирующий температурный подъем в контактирующем с частицей ВВ и, следовательно, реализуемая величина $P_{кр}$ смеси должны определенным образом зависеть от размеров твердых частиц. Этот вывод противоречит результатам наших опытов, из которых следует независимость $P_{кр}$ (в определенных пределах) от размера частиц твердых компонентов взрывчатой смеси.

Несколько иная картина фрикционного разогрева твердых частиц наблюдается при сухом трении с износом трущихся тел. Теоретический анализ различных моделей трения с износом выполнен Амосовым в работе [11]. Ограничиваясь адиабатическим случаем разогрева тел в слое пластического износа, он показал, что температура на передней кромке частицы может, хотя и медленно (логарифмически), но тем не менее неограниченно

но возрастать с увеличением продолжительности трения.

Сделанные выводы о величине и положении на твердой частице температурного максимума фрикционно-пластического разогрева имеют прямое отношение к анализу механической чувствительности металлизированных взрывчатых систем. Поэтому рассмотрим подробнее вопрос о пластическом износе твердых частиц, несколько упростив, по сравнению с анализом из [11], подход к его описанию, чтобы нагляднее получить представление о физической природе возбуждения взрыва по данному механизму.

Прежде всего, проведем внешнюю аналогию между механическими характерами появления слоя пластического износа и квазизжидкой прослойки на контактной поверхности твердых вязкопластичных тел при их движении с разными скоростями. Эту прослойку, в которой касательные напряжения достигают своего максимального значения, равного пределу прочности материала твердого тела на сдвиг, называют бингамовым пограничным слоем (ПС) [12, 13], устраняющим реальный разрыв скоростей контактирующих тел. Этот ПС, в свою очередь, аналогичен по своей значимости рейнольдсову ПС, образуемому при обтекании твердого тела высокоскоростным потоком жидкости (газа) и также устраняющему разрыв скоростей на поверхности тела [14].

Из четырех характерных для вязкопластического течения величин: μ (пластическая вязкость), V , τ_0 , d , можно образовать лишь единственную комбинацию с размерностью длины, т.е. $s = (\mu V d / \tau_0)^{1/2}$. Вводя параметр Бингама $B = \tau_0 d / \mu V$, найдем толщину бингамова ПС: $s = d / B^{1/2}$ (толщина рейнольдсова ПС записывается в виде $s \sim d / Re^{1/2}$). Для большинства твердых веществ в состоянии развитого вязкопластического течения число B может быть >1 или <1 в зависимости от соотношения между силами вязкости и силами, создающими прочностные связи в текучей среде. Поэтому толщина s бингамова слоя износа может быть мала или соизмерима с размерами контактирующих твердых тел.

Начало прямоугольной системы координат поместим на передней кромке твердой частицы; при этом скорость набегающего потока V совпадает с осью x . Вследствие малости $s \ll d$ скорость потока в слое износа в направлении оси x запишем в виде $V_x = V(1 - e^{-x/s})$ с учетом того, что при $x = d$ скорость $V_x \approx V$. Из уравнения неразрывности для случая плоского течения рассчитаем вторую компоненту потока: $V_y = (-V_y/s)e^{-x/s} \ll V_x$, и найдем интенсивность скоростей деформации $J = (2V/s)e^{-x/s}$. Тогда уравнение объемного притока тепла в слое износа запишется так:

$$\rho c V_x \frac{dT}{dx} = \tau_0 J - \frac{\beta(T - T_0)}{d}, \quad T(x_0) = T_0, \quad (3)$$

где β — коэффициент теплообмена частицы с окружающей средой (октогеном). Решение (3), записанное в квадратурах, имеет вид

$$\Delta T = \theta(e^{x/s} - 1)^{-a} \int_{x_0/s}^{x/s} (e^z - 1)^{a-1} dz, \quad (4)$$

$$a = \frac{\beta s}{\rho c V d}, \quad \theta = \frac{2\tau_0}{\rho c}.$$

При отсутствии теплопотерь ($a = 0$) из (4) находим решение в виде распределения температур вдоль зоны фрикционного контакта:

$$\Delta T = \theta \ln \frac{1 - e^{-d/s}}{1 - e^{-x_0/s}}, \quad (5)$$

Как видно из (5), фрикционный разогрев логарифмически обращается в ∞ при $x_0 \rightarrow 0$ (на передней кромке частицы) и равняется нулю при $x_0 = d$ (на задней кромке частицы), что согласуется с выводами Амосова [11]. При $a \neq 0$ приближенное вычисление интеграла (4) при $x = d$ приводит к решению вида

$$\Delta T \approx \frac{\theta}{a} \left[1 - \left(\frac{x_0}{d} \right)^a \right]. \quad (6)$$

Из (6) следует, что фрикционный разогрев $\Delta T_m = \theta/a$ максимален при $x_0 = 0$ и равен нулю при $x_0 = d$. Таким образом, теплоотвод из зоны трения устраняет неопределенность во фрикционном разогреве в начальной точке контакта частицы с ударником, но температурный максимум разогрева остается по-прежнему там же. Его значение зависит от параметра теплоотвода: он может быть больше (при малых $a < 1$) или меньше (при больших $a > 1$) масштабной температуры при трении, θ , которая для алюминия составляет 350 К (по данным копровых экспериментов τ_0 для прессованных таблеток из порошкообразного А(8) $\tau_0 \approx 0.35$ ГПа). Заметим, что математическая запись параметра a сводится к комбинации нескольких критериев подобия: $Nu B^{1/2} Re^{-1}$, и поэтому явно не зависит от d .

Таким образом, результаты проведенного анализа фрикционного разогрева твердых частиц взрывчатой смеси при переходе слоя износа частиц в вязкопластическое состояние приводят к следующим выводам:

а) при слабом теплоотводе в контактную поверхность ударника (наковальни) фрикционно-пластический разогрев способен стать реальной причиной инициирования взрыва октогена, нагретого от раскаленных твердых частиц. При сухом трении частиц о поверхность ударника наблюда-

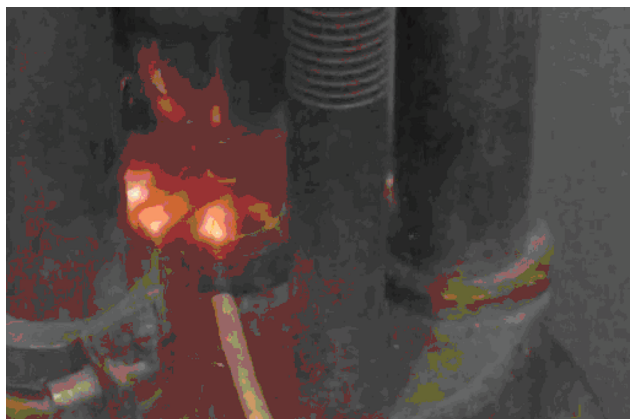


Рис. 2. Фотография взрыва смеси октогена с А(15).

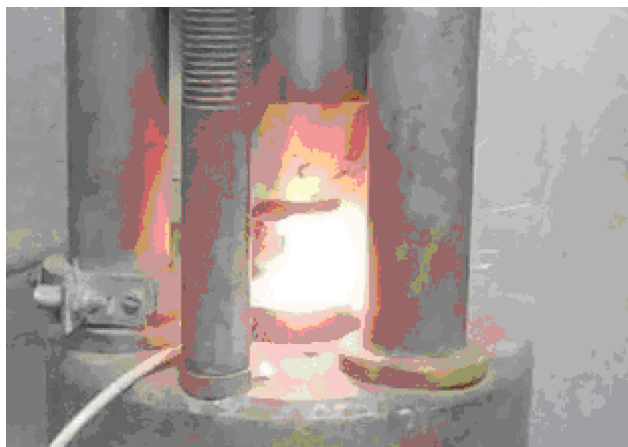


Рис. 3. Фотография взрыва смеси октогена с А(0.1).

лась бы некая степенная зависимость $P_{кр}$ от размера частиц и состава смеси;

б) механизм взрыва, согласно которому передняя кромка движущейся частицы испытывает сильный и практически постоянный в условиях однородного контакта с ВВ разогрев, объясняет причину независимости давлений инициирования от размера частиц твердого компонента смеси. Этому механизму также способствует образование многочисленных горячих продуктов износа (микрокапель алюминия размером $\ll d$),кратно увеличивающих начальный очаг разогрева;

в) согласно данному механизму получает объяснение независимость (в определенных пределах) величины $P_{кр}$ смеси от концентрации твердого компонента. Действительно, даже небольшая добавка твердых частиц к мощному ВВ способна при надлежащих условиях внешнего воздействия стать реальной причиной взрыва.

Поясним причину отклонений $P_{кр}$ от среднего значения P_b , наблюдаемых на рис. 1. Они объясняются различными состояниями смесей в условиях взаимодействия с раскаленными частицами, которые влияют на процессы возбуждения и развития реакции из возникающих очагов инициирования. Эти состояния способствуют взрыву при малых α (состав смеси энергетически сбалансирован, значения $P_{кр}$ несколько ниже среднего) и затрудняют его при больших α (состав переобогащен горючим, $P_{кр}$ несколько выше среднего). Высокий теплоотвод из множества очагов разогрева является реальной причиной резкого увеличения $P_{кр}$ смеси при $\alpha \rightarrow 1$.

5. Из вышесказанного следует, что инициирование смесей с А(0.1) при малых $0 < \alpha < 0.3$ также происходит по механизму зажигания октогена раскаленными частицами и, наиболее вероятно, без активного участия химического взаимодействия компонентов, поскольку давления инициирова-

ния по-прежнему остаются в доверительных пределах: 0.51–0.65 ГПа. Этого нельзя утверждать в случае смесей с $0.4 < \alpha < 0.7$, давления инициирования которых располагаются на уровне 0.43 ГПа ($z = 1.68$), заметно ниже доверительного интервала давлений взрыва смесей с микрочастицами. Представляется возможным, что в рассмотренном диапазоне концентраций А(0.1) смеси взрываются по комбинированному механизму, включающему диссипативный (объемно-пластический) разогрев двухфазной взрывчатой смеси с участием теплообмена горячих наночастиц Al с октогеном и химическое взаимодействие металла с продуктами первичного термораспада ВВ, которое увеличивает тепловыделение в очаге разогрева и обеспечивает мощное развитие взрыва за пределы возникшего очага реакции. Косвенно это подтверждают фотографии вспышек смесей октогена с микро- и наночастицами Al при ударе на копке (рис. 2 и 3, $\alpha = 0.5$). Свечение продуктов взрыва смеси с микрочастицами носит очаговый характер, цвет пламени — в основном красный. Свечение взрыва смеси с наночастицами представляется в виде яркой вспышки желто-белого цвета. Очевидно, в данном случае суммарный взрывной эффект смеси заметно усиливался за счет объемного воспламенения смеси алюминия и продуктов распада октогена с кислородом окружающего воздуха.

ВЫВОДЫ

1. Механизм сенсibilизации октогена частицами Al микроразмера объясняется фрикционно-пластическим разогревом металлических частиц, воспламеняющих ВВ во время движения в потоке фрагментов разрушения смесевых зарядов при ударе.

2. Смесей октогена с наноразмерными частицами Al в существенно ограниченном диапазоне концентраций последнего взрываются в соответствии с

комбинированным механизмом инициирования, включающим процессы контактного нагрева и воспламенения октогена и активного химического взаимодействия продуктов распада ВВ с алюминием в очагах взрыва разрушающегося заряда.

Автор признателен Н.В. Дмитриеву за полезные дискуссии.

Работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФИЦ ХФ РАН на выполнение государственного задания по теме 44.8 “Фундаментальные исследования процессов превращения энергоемких материалов и разработка научных основ управления этими процессам” (регистрационный номер АААА-А17-117040610346-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Махов М.Н.* // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 2. С. 42.
2. *Илюшин М.А., Котомин А.А., Душенок С.А.* // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 2. С. 24.
3. *Дорофеев Е.М., Шереметев А.Б., Лемперт Д.Б.* // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 10. С. 33.
4. *Бовден Ф., Иоффе А.* Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. М.: Изд-во иностр. лит., 1955.
5. *Дубовик А.В., Дмитриев Н.В., Леонтьев В.О.* // Взрывное дело. 2018. № 20/77. С. 54.
6. *Теселкин В.А.* // Хим. физика. 2008. Т. 27. № 8. С. 43.
7. *Афанасьев Г.Т., Боболев В.К.* Инициирование твердых взрывчатых веществ ударом. М.: Наука, 1968.
8. *Дубовик А.В.* Чувствительность твердых взрывчатых систем к удару. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2011.
9. *Дубовик А.В., Дмитриев Н.В.* // Безопасность труда в пром-сти. 2020. № 7. С. 87.
10. *Понафидин Р.В., Дубовик А.В.* // Успехи в химии и хим. технологии. 2018. Т. XXXII. № 10. С. 132.
11. *Амосов А.П.* Теплофизические модели трения инертных и взрывчатых материалов. М.: Машиностроение, 2011.
12. Реология / Под ред. Эйриха Ф. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
13. *Мосолов П.П., Мясников В.П.* Механика жестко-пластических сред. М.: Наука, 1981.
14. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. Изд. 3. М.: Наука, 1986.