

УДК 662.215.4+534.222.2

УДАРНО-ВОЛНОВОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ ТЕРМИТНОЙ СМЕСИ $Al + CuO$ С. Ю. Ананьев¹, Л. И. Гришин^{1,2}, А. Ю. Долгобородов^{1,2,3},
Б. Д. Янковский¹¹Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, aldol@ihed.ras.ru²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409 Москва³Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 119991 Москва

Проведено исследование ударно-волнового инициирования химической реакции в прессованных таблетках из стехиометрической смеси порошков Al и CuO внутри стальной трубки. Исследована динамика химического превращения в гетерогенном потоке продуктов реакции смеси при диспергировании материала прессованной таблетки в волне разрежения. По пирометрическим измерениям максимальная яркостная температура продуктов химического превращения составила ≈ 3500 К.

Ключевые слова: термитные составы, ударно-волновое инициирование, химическая реакция, детонация.

DOI 10.15372/FGV20200213

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что добавки к индивидуальным взрывчатым веществам (ВВ) оказывают влияние на изменение параметров процесса детонации и состав продуктов взрыва [1–3]. Характер этого влияния зависит во многом от времени вовлечения их в химические взаимодействия с продуктами детонации [4, 5]. Ряд применений взрывчатых материалов требует более продолжительного энерговыделения, чем это происходит в случае использования индивидуальных ВВ или традиционных смесей из них [6, 7]. Дополнительное энерговыделение можно получить, например, при использовании добавок алюминия или его смесей с окислителями ($KClO_4$, $KMnO_4$, политетрафторэтилен и др.), догорающих в воздухе за фронтом ударной волны [8–11]. В последние годы также рассматривается возможность использования различных взрывчатых составов на основе механоактивированных термитных смесей окислитель — горючее с компонентами, перемешанными на субмикронном уровне [12].

При детонации смеси ВВ с термитным составом на компоненты последнего действуют как давление детонационной волны, так и высокая температура продуктов детонации. Эти два фактора служат инициирующим импульсом для химического взаимодействия между

компонентами термитного состава. Вследствие ограниченной протяженности области высоких (детонационных) параметров продуктов детонации ВВ (давление, температура) [13, 14] продолжительность их интенсивного инициирующего импульса достаточно оценивать интервалом $1 \div 2$ мкс.

В данной работе с использованием полученных ранее результатов [15] исследовано влияние ударно-волнового нагружения на химические превращения в смеси порошков Al и CuO .

ИССЛЕДУЕМЫЙ МАТЕРИАЛ
И СХЕМА НАГРУЖЕНИЯ

В качестве исходных компонентов термитного состава использовали алюминиевую пудру марки ПП-2 (плоские частицы линейного размера $50 \div 100$ мкм, толщиной $2 \div 5$ мкм) и порошок оксида меди CuO (ЧДА) ($20 \div 50$ мкм). Соотношение масс компонентов Al/CuO для приготовления смеси соответствовало стехиометрической пропорции 18.5/81.5. Смешение и механоактивацию компонентов проводили в вибрационной шаровой мельнице. Подробности механоактивации термитных смесей описаны в [15]. Для предотвращения реакции на стадии обработки в смесь добавляли гексан, а активацию проводили циклами по 60 с. Время активации меняли от 2 до 20 мин. После приготовления смесь высушивали. В ряде опытов также были использованы

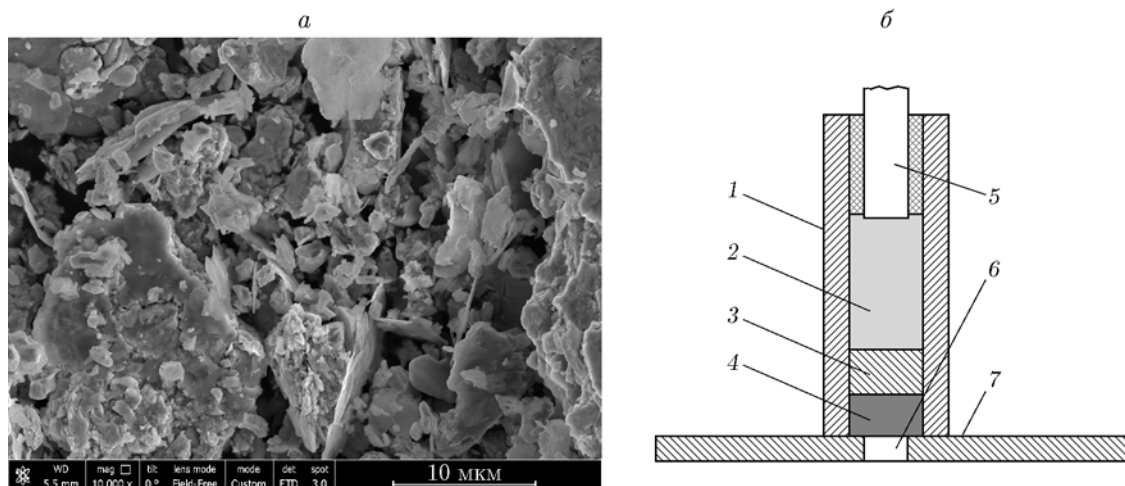


Рис. 1. Фотография смеси после механоактивации (*a*) и схема экспериментальной сборки для ударного инициирования прессованной термитной таблетки (*б*):

1 — стальная трубка, 2 — заряд ВВ, 3 — стальной поршень, 4 — термитная таблетка, 5 — детонационный шнур, 6 — сопловое отверстие, 7 — стальная пластина

смеси из наноразмерных компонентов V-Alex (100 ÷ 200 нм) и $n\text{CuO}$ (50 ÷ 80 нм) (ООО «Передовые порошковые технологии», г. Томск).

Полученные порошки представляли собой полидисперсную смесь достаточно крупных конгломератов из плоских фрагментов частиц Al (≈ 10 мкм) с измельченными до субмикронных размеров частицами CuO (рис. 1, *a*). В силу разных прочностных характеристик материалов, разброса в размерах и форме частиц конгломераты имели вид неупорядоченных структур с многочисленными точками контакта компонентов. Предположительно эти точки могут служить очагами первичного химического взаимодействия.

Сухую смесь в количестве 1 г прессовали в таблетки с пористостью 10 ÷ 36 %.

Ударно-волновое нагружение прессованной таблетки проводилось продуктами взрыва заряда ВВ внутри стальной трубки с внутренним и внешним диаметрами 8 и 14 мм (рис. 1, *б*). В качестве заряда ВВ использовали флегматизированный гексоген плотностью ≈ 1.15 г/см³. Цилиндрический стальной диск между зарядом ВВ и таблеткой играл роль поршня и тепловой защиты от горячих продуктов детонации. Стальную трубку закрепляли на стальной пластине толщиной 2.5 мм соосно с сопловым отверстием в пластине. Площадь соплового отверстия S_n меняли в диапазоне 0 ÷ 1 от площади термитной таблетки S_0 . Соотношение масс заряда ВВ, поршня и

таблетки сохраняли постоянным: 1/1/1. Масса каждого элемента составляла 1 г.

Интенсивность нагружения меняли включением воздушного промежутка (0 ÷ 3 длины заряда ВВ) между зарядом и последующими элементами сборки. Интенсивность разгрузки таблеток и степень ее последующего диспергирования в волне разрежения задавали изменением площади соплового отверстия. При площади соплового отверстия $S_n \leq 0.5S_0$ стальной поршень застревал в сопле и предотвращал вылет продуктов детонации (рис. 2, *б*, поз. 7).

ПАРАМЕТРЫ НАГРУЖЕНИЯ И ДИССИПАЦИЯ ЭНЕРГИИ

При детонации заряда ВВ термитная таблетка через стальной поршень нагружается ударной волной. По данным [16] ударную адиабату исходной таблетки из смеси Al + CuO плотностью 4.24 г/см³ (пористость 16 %) можно представить выражением $D = 1.32 + 1.98u$ (кривая 3 на рис. 2). Начальное значение давления нагружения таблетки определяет точка пересечения этой адиабаты с кривой разгрузки стального поршня 4 (точка $p_2 \approx 12$ ГПа на рис. 2). Вследствие деформации и взаимного перемещения частиц исходных компонентов в термитных таблетках происходит частичный переход энергии (диссипация) ударной волны в тепло [17, 18].

Работу деформации наименее прочного компонента таблетки можно оценить по соот-

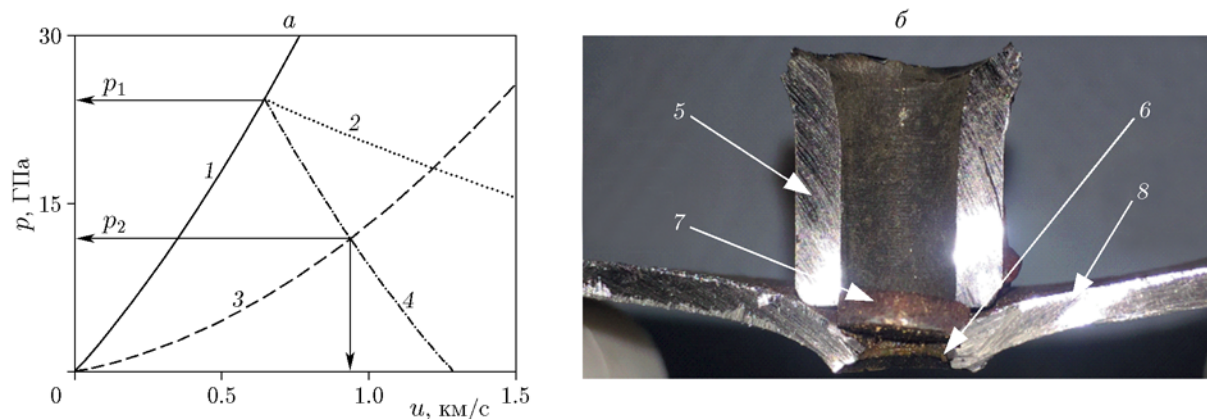


Рис. 2. p - u -Диаграмма нагружения таблетки стальным поршнем (а). Элементы сборки после ударно-волнового нагружения (б):

а: 1 — ударная адиабата стального поршня, 2 — кривая разгрузки продуктов детонации, 3 — ударная адиабата таблетки, 4 — кривая разгрузки стального поршня, p_1 — начальное давление ударной волны в стальном поршне, p_2 — в таблетке; б: 5 — стальная трубка, 6 — сопловое отверстие, 7 — стальной поршень, 8 — стальная пластина

ношению $A_{def} \approx \sigma_i V_i \varepsilon$, где σ_i — предел текучести компонента, V_i — объем компонента, ε — пористость. Для частиц Al ($\sigma_{Al} = 120$ МПа) при пористости таблетки 20 % эта величина равна ≈ 1.6 Дж.

Экспериментальная оценка диссипации энергии ударной волны в термитной таблетке Al + CuO проведена на основе сравнения остаточных деформаций поршня и стальной пластины, полученных при статическом и ударно-волновом нагружении экспериментальной сборки [19]. Стальная пластина в этих опытах сопла не имела. Статическое нагружение элементов сборки проводили на испытательном прессе МС-1000. В опытах определены зависимости остаточной деформации от приложенного усилия для каждого из элементов. Площадь под этими зависимостями определяет затраты энергии A_p и A_{def} на деформацию соответственно стального поршня и стальной пластины. Калибровочные кривые для нахождения затрат энергии по известной деформации представлены на рис. 3 (кривые 1, 3).

При ударно-волновом нагружении экспериментальных сборок начальная скорость деформируемой поверхности стальной пластины, полученная по данным пьезоэлектрических датчиков, составляла $\approx 140 \div 150$ м/с. Скорость деформации стальной пластины можно оценить как $5 \cdot 10^3$ с $^{-1}$. Остаточная деформация стальной пластины происходит под действием дошедшей до пластины энергии первичной ударной волны. Отсутствие разрушения

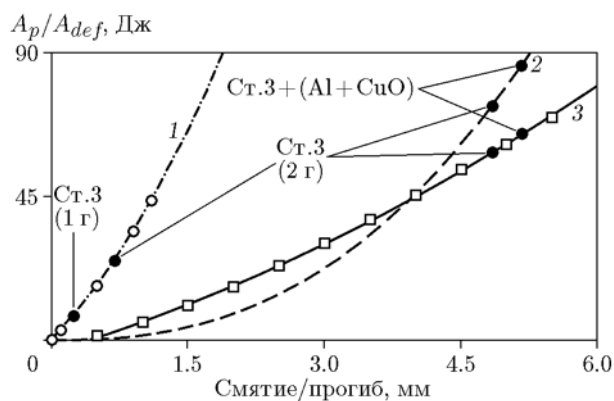


Рис. 3. Калибровочные зависимости затрат энергии A_p на смятие стального поршня диаметром 8 мм и высотой 5 мм (1) и A_{def} на прогиб стальной пластины толщиной 2.5 мм (3):

зависимость 2 построена по соотношению (1) для стальной пластины; точки — результаты опытов при динамическом нагружении с разным сочетанием элементов (см. рис. 4) в сборке

стальной пластины (рис. 4) позволяет рассматривать баланс энергии в представлении абсолютно неупругого удара:

$$E_{load} = A_p + E_{fr} + A_{def},$$

где E_{load} — энергия нагружения, E_{fr} — энергия диссипации в термитной таблетке. При наполнении экспериментальной сборки элементами из разных материалов реализуются разные остаточные деформации стальной пластины. Сравнение этих деформаций позволяет оце-

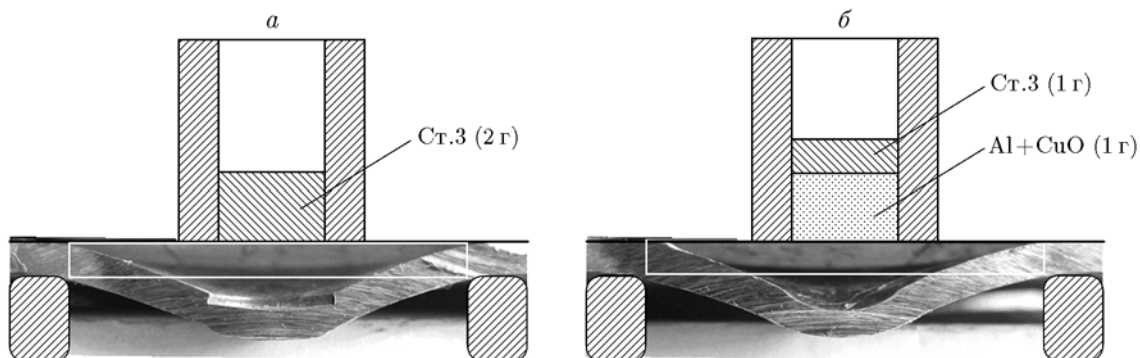


Рис. 4. Схемы экспериментальных сборок для определения диссипации энергии в термитной таблетке через остаточные деформации стального поршня и стальной пластины

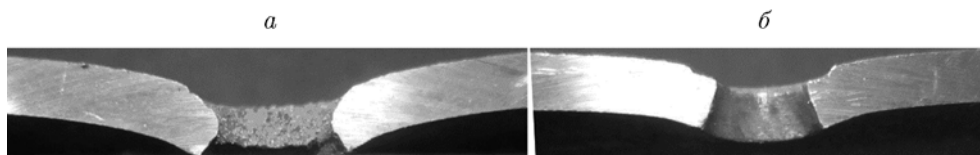


Рис. 5. Фотографии остаточной деформации сопловой части ($S_n = 0.5S_0$) стальной пластины: *а* — деформация после нагружения сборки поршень (1 г, толщина 2.5 мм) + таблетка Al + CuO (1 г, высота 5 мм) с инициированием реакции; *б* — деформация после нагружения таблетки Al + CuO (2 г, высота 10.5 мм) без инициирования реакции

нить диссипацию энергии в термитной таблетке. Для этого в экспериментах использованы следующие сочетания элементов (см. рис. 4): стальной поршень (1 г) + стальной поршень (1 г); стальной поршень (1 г) + термитная таблетка (Al + CuO) (1 г).

В предположении одинакового энергетического воздействия заряда ВВ на совокупность элементов для каждой из экспериментальных сборок ($E_{load} = \text{const}$) составлена система из двух линейных уравнений с двумя неизвестными. Решение системы с учетом экспериментальных данных и калибровочных зависимостей (см. рис. 3) определяет энергию диссипации $E_{fr} = 17 \pm 5$ Дж в термитной таблетке толщиной 5 мм и массой 1 г. Это значение может быть увеличено в 1.5 раза (коэффициент динамичности) до $E_{fr} = 26 \pm 7$ Дж, если учесть увеличение прочностных характеристик стальных элементов при динамической деформации по сравнению со статической. Работа динамической пластической деформации стальной пластины для схем рис. 4 может быть также определена по полуэмпирическому соотношению [20]

$$A_{def} = 471\pi R_0^2 H_0 (1.33(h/R_0)^2)^{1.23}, \quad (1)$$

где 471 (МПа) — эмпирический коэффициент для стали марки Ст.3, R_0 — радиус опорного кольца, H_0 и h — начальная толщина и глубина прогиба стальной пластины.

В случае нагружения более высокой термитной таблетки массой 2 г энергия ударной волны заметно падает с длиной пробега, что приводит к снижению вероятности инициирования реакции в нижележащих слоях состава вплоть до полного ее затухания. Отсутствие реакции сказывается на характере остаточной деформации сопловой части стальной пластины (рис. 5). В таком случае отсутствует термическое воздействие на сопло и уменьшается объем его остаточной пластической деформации [21].

ФОРМИРОВАНИЕ И СТРУКТУРА ПОТОКА

При выходе ударной волны на границу таблетки с воздухом в материал таблетки отражается волна разрежения, в которой происходит диспергирование тела таблетки на кластеры. Кластеры включают в себя разное число частиц компонентов с очагами первичного инициирования химического взаимодействия. Произвольное распределение кластеров по мас-

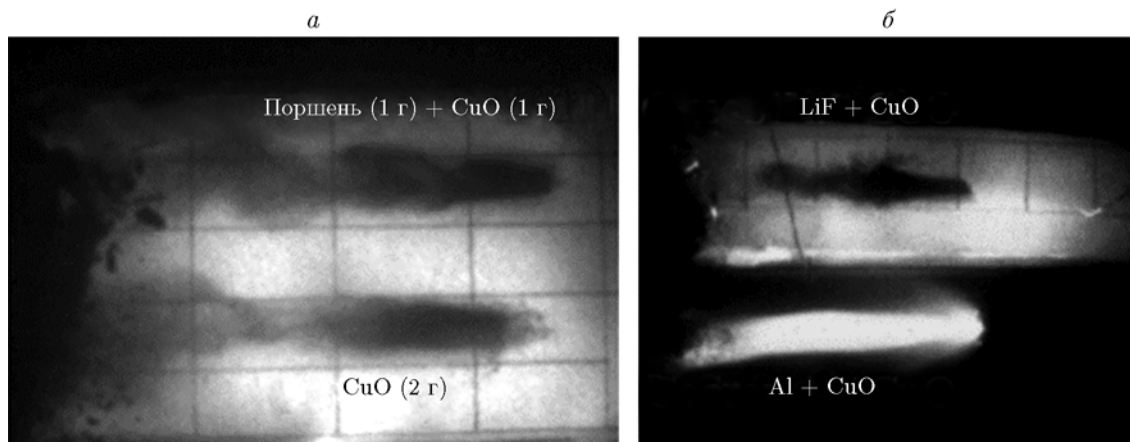


Рис. 6. Кадры скоростной фотосъемки процесса разлета продуктов (время слева направо) при одновременном взрывном нагружении инертных таблеток CuO (*a*, сопло $S_n = S_0$, момент съемки кадра 1 700 мкс) и инертной (LiF + CuO) и реагирующей (Al + CuO) смесей (*б*, сопло $S_n = 0.5S_0$, момент съемки 2 150 мкс)

се задает им разные скорости на срезе экспериментальной сборки, что приводит к образованию протяженного потока ускоренных частиц. Это подтверждается фотографиями разлета инертного материала таблетки на фоне светлого экрана после ударно-волнового нагружения (рис. 6,*a*) [22]. Фотографии получены с помощью электронно-оптической камеры CORDIN-226-16G. Камера позволяет получать 16 кадров в промежутке времени до 5 мс с экспозицией от 5 нс. Момент съемки кадра на рис. 6 — 1 700 мкс, экспозиция съемки — 1 мкс. Верхний поток (скорость 438 м/с) образован при ускорении таблетки массой 1 г через стальной поршень массой 1 г. Нижний поток (скорость 437 м/с) образован при ускорении таблетки массой 2 г без стального поршня. Скорости фронта потока определены аппроксимацией данных $x-t$ -диаграмм, построенных по 8 ÷ 12 фотографиям. Визуализация потока свидетельствуют о его гетерогенной структуре.

Таким же образом происходит образование потока частиц и в случае химического взаимодействия между компонентами, что подтверждается кадрами совместного скоростного фотографирования процесса ударного нагружения двух других экспериментальныхборок (рис. 6,*б*). На верхней части фотографии зафиксирован темный поток (скорость 491 м/с) материала таблетки из частиц инертной смеси LiF + CuO (LiF близок по сжимаемости и плотности к Al и использован как его инертный аналог). В нижней части фотографии зафиксирован светящийся поток продуктов реак-

ции термитного состава Al + CuO (скорость 499 м/с). Нагружение таблеток из инертных и реакционноспособных компонентов происходило в одинаковых условиях. Практически одинаковая динамика обоих потоков означает, что выделение химической энергии в потоке частиц практически не влияет на его скорость, которая определяется лишь энергией заряда ВВ и условиями истечения. Этот вывод подтверждается результатами опытов по взрывному нагружению как чистой термитной смеси, так и разбавленной инертным материалом (фракции песка ≈ 200 мкм) в пропорциях 75/25 и 50/50. При площади сечения сопла $S_n = S_0$ средняя скорость фронта свечения в этих экспериментах составила 460 ± 10 м/с к моменту времени 600 мкс.

Массовые трековые следы на бумажной поверхности, расположенной вдоль потока (рис. 7,*a*), и фольгах-свидетелях, расположенных поперек потока на дистанции ≈ 200 мм (рис. 7,*б,в*), подтверждают присутствие дисперсного материала таблетки в потоке как в случае инертного, так и в случае реагирующего потока [22]. Отдельные следы (до 10 шт.) фиксируются на фольге-свидетеле на дистанции 2 000 мм.

ДИНАМИКА И ПАРАМЕТРЫ ПОТОКА

Характерным признаком химической реакции в потоке является яркое свечение продуктов. Динамику распространения области свечения определяли по результатам

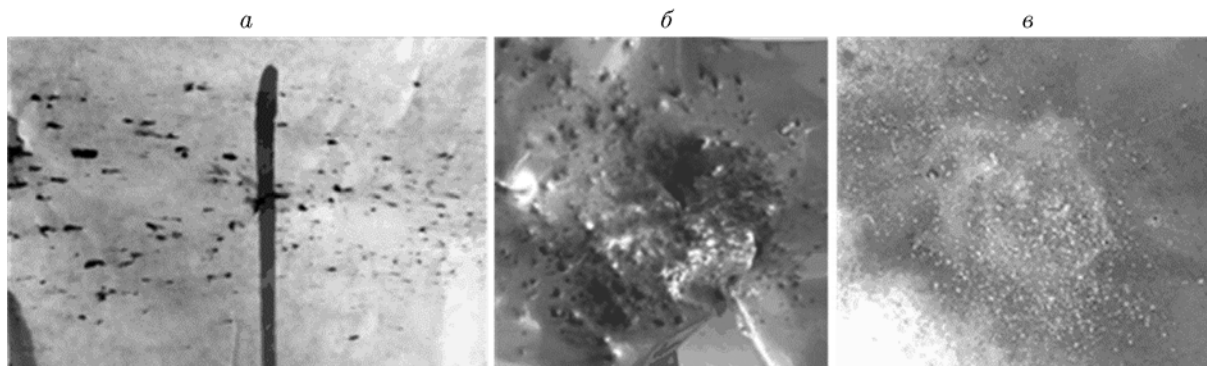


Рис. 7. Фотографии трековых следов дисперсного материала таблеток на бумажном экране и фольгах-свидетелях (а), а также следов материала инертной таблетки (б) и продуктов реакции сгоревшей таблетки (в)

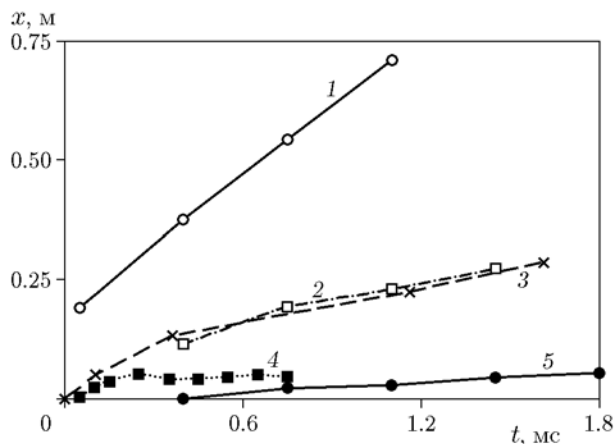


Рис. 8. Динамика различных участков области свечения:

1 — фронт потока (средняя скорость 490 м/с), 2 — центр потока (145 м/с), 3 — электропроводный фронт потока (164 м/с), 4 — радиус потока, 5 — тыл потока (37 м/с)

скоростного фотографирования электронно-оптической камерой CORDIN-226-16G. Кроме того, использовали хронограммы замыкания ионизированными продуктами потенциальных электродов, размещаемых вдоль траектории разлета продуктов. На рис. 8 представлена характерная динамика различных участков области свечения.

С увеличением сечения соплового отверстия в стальной пластине растут скорость истечения и объем выбрасываемого материала таблетки (рис. 9). Так, начальная скорость области свечения потока увеличивается приблизительно со 150 до 650 м/с с увеличением диаметра соплового отверстия, а скорость увеличения площади продольного сечения обла-

сти свечения достигает $35 \text{ мм}^2/\text{мкс}$ к моменту времени 200 мкс. По совокупности данных на рис. 9 наиболее эффективным для использования в последующих опытах было принято значение относительного сечения $0.5S_0$.

Включение воздушного промежутка между зарядом ВВ и элементами сборки меняет характер нагружения: вместо ударно-волнового нагружения происходит импульсное воздействие при торможении потока продуктов детонации. Однако в пределах использованных длин промежутков их присутствие не сказалось на скорости истечения выбрасываемого материала таблетки для моментов времени до 300 мкс. При всех вариантах длины воздушного зазора и при площади сечения сопла $S_n = S_0$ скорость истечения оказалась равна $450 \pm 20 \text{ м/с}$.

Изначально предполагалось, что исходные параметры термитной таблетки (размер частиц, доза предварительной механоактивации, пористость) могут влиять на инициирование и протекание химического взаимодействия между компонентами и, соответственно, на динамику области свечения. Экспериментальные данные по скорости распространения области свечения при ударном нагружении термитных таблеток с разными исходными характеристиками приведены в таблице. Результаты экспериментов показывают, что примерно до 600 мкс ни доза предварительной механоактивации смеси, ни пористость таблетки, ни разбавление инертным материалом не влияют на динамику области свечения.

Затем площадь продольного сечения области свечения идет на убыль и особенно быстро для таблеток с дозой активации смеси 6 и

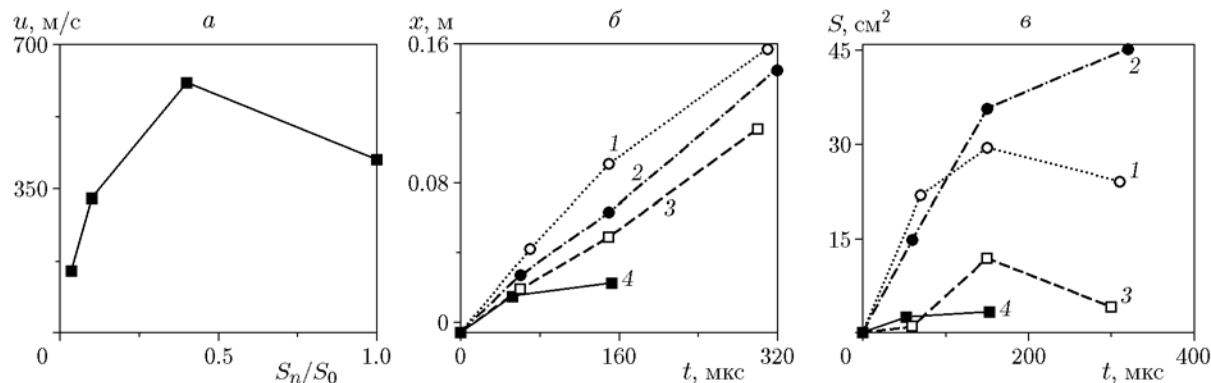


Рис. 9. Влияние сечения соплового отверстия на скорость истечения (а) и динамику объема выбрасываемого материала таблетки (б, в):

x — координата головной части облака продуктов, S — максимальное сечение облака продуктов;
 1 — $S_n = S_0$; 2 — $S_n = 0.4S_0$; 3 — $S_n = 0.1S_0$; 4 — $S_n = 0.01S_0$

Результаты экспериментов

№ п/п	Параметр	Диапазон параметра		Результат		
1	Время механоактивации смеси при $S_n = S_0$	2 ÷ 20 мин		Средняя скорость истечения к 300 мкс 475 ± 15 м/с Прогиб стальной пластины толщиной 2.5 мм 5.5 ± 0.2 мм		
2	Пористость таблетки при $S_n = 0.5S_0$	10 ÷ 36 %		Начальная скорость истечения 650 ± 20 м/с		
3	Размер исходных частиц смеси при $S_n = S_0$			Скорость истечения, м/с, в моменты времени		
				250 мкс	500 мкс	700 мкс
		Наноразмер		590	563	386
		Микронный размер		645	527	480
4	Смесь насыпной плотности (масса 1 г)	Пористость 60 %	$S_n = 0.5S_0$	Начальная скорость истечения 675 м/с		
			$S_n = S_0$	Средняя скорость к 600 мкс 474 м/с		
5	Смесь термитного состава и песка насыпной плотности (масса 1 г) при $S_n = S_0$	25 % песка		Средняя скорость к 600 мкс 466 м/с		
		50 %		Средняя скорость к 600 мкс 460 м/с		
		75 %		Средняя скорость срединной части потока 270 м/с		

8 мин, имеющих по данным [15] наиболее высокие скорости горения. По-видимому, процесс взаимного перемещения частиц при ударно-волновом нагружении приводит к активации химической реакции на поверхности контакта частиц металла и окислителя, превышающей

эффект предварительной механоактивации.

Для таблеток смеси из наноразмерных компонентов зафиксировано уменьшение начальной скорости потока и более быстрое завершение химического взаимодействия. Это может быть обусловлено большей диссипаци-

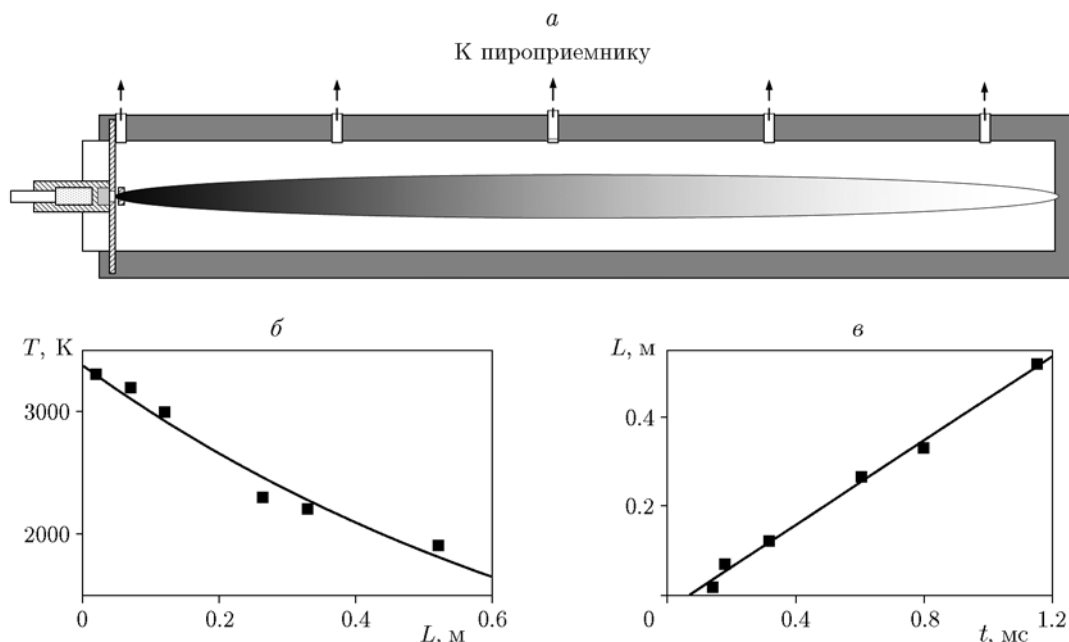


Рис. 10. Схема эксперимента по измерению яркостной температуры продуктов реакции смеси (а), распределение яркостной температуры вдоль направления истечения материала таблетки (б), хронограмма распространения фронта области свечения (474 м/с) по измерениям яркостной температуры продуктов горения (в)

ей энергии инициирующей ударной волны в таблетке с большей удельной поверхностью частиц.

Схожая динамика потоков диспергированного материала таблеток и областей свечения за пределами сопла одного сечения задается, очевидно, постоянством энергии заряда ВВ. Таким образом, стабильность энергетических и конструктивных условий ударного нагружения термитных таблеток с разной технологической подготовкой нивелирует эту разность при инициировании и протекании термитной реакции в потоке.

Динамику изменения яркостной температуры потока контролировали вдоль линии распространения с помощью четырехканального пирометра на длинах волн 500, 600, 700 и 800 нм (рис. 10). Максимальная яркостная температура потока в начале траектории, осредненная по длинам волн, равна 3500 К. Дальнейшее снижение яркостной температуры потока составляет 1.65 К/мкс. Термическое действие (в виде сине-фиолетового цвета побежалости) на фольгу толщиной 0.1 мм из нержавеющей стали на стенке канала диаметром 90 мм фиксируется на расстоянии до 450 мм. Для нержавеющей стали этот цвет побежалости со-

ответствует температуре 600 °С.

Высокая яркостная температура продуктов позволяет предположить присутствие ионизированных частиц в потоке. Оценка удельного электрического сопротивления по импульсам тока проводимости между потенциальными электродами с заданной разностью потенциалов дает значение по порядку величины $\approx 10^7$ Ом·мм²/м, что свидетельствует о достаточно низкой степени ионизации продуктов. Охлаждение содержимого потока приводит к конденсации продуктов реакции (рис. 11) в виде разнообразных частиц. При этом Си конденсируется как в виде свободных наноразмерных частиц, так и в виде капель микронного размера, застывших на поверхности частиц Al₂O₃. Оксид Al₂O₃ конденсируется преимущественно в виде сферообразных частиц микронных размеров (≈ 10 мкм), поверхность которых состоит из более мелких слипшихся частиц.

Таким образом, результаты экспериментов свидетельствуют, что кратковременное (1 ÷ 2 мкс) ударно-волновое нагружение пористой таблетки из термитной смеси порошков Al и CuO массой 1 г сопровождается диссипацией в ней энергии ≈ 20 Дж, приводящей к инициированию химического взаимодействия между

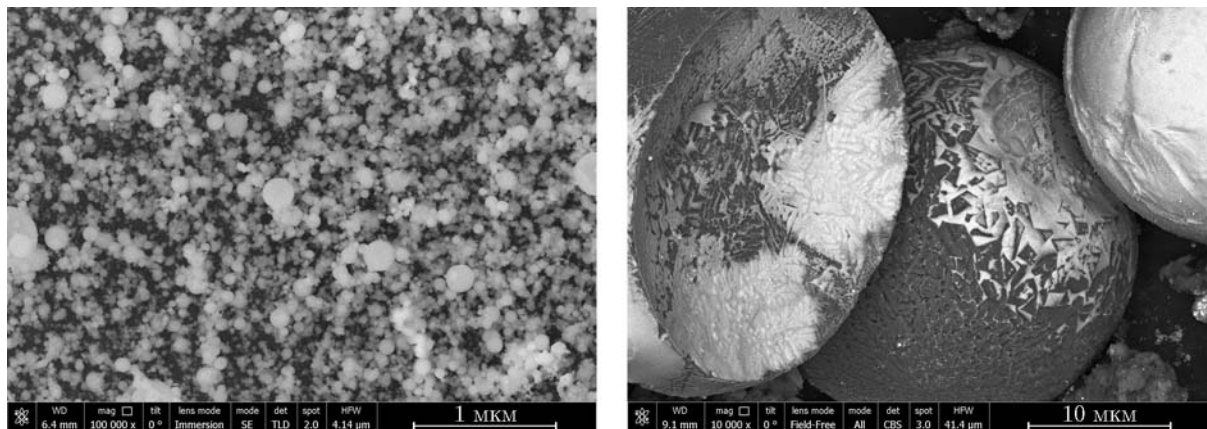


Рис. 11. Фотографии продуктов реакции: светлые включения — наночастицы Cu, серые — сферические частицы Al_2O_3 с застывшей на поверхности медью

компонентами смеси с последующим продолжительным ($4 \div 5$ мс) догоранием. Иницирование реакции не оказывает влияния на параметры нагружения за время прохождения ударной волны по таблетке. Это ставит под сомнение заключение о роли иницированного экзотермического химического взаимодействия как причине изломов на *D-u*- и *p-u*-диаграммах, обнаруженных в [16] для прессованных таблеток из смеси порошков Al и CuO.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ТЕРМИТНОЙ РЕАКЦИИ В ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЕ

Ранее отмечалось, что предварительная механоактивация в шаровых мельницах, а также последующее прессование смеси обеспечивают выравнивание исходных размеров частиц (различие в пределах порядка). Можно предположить, что в случае ударного нагружения через стальной поршень происходит преимущественно одномерное (с точностью до размера частиц компонентов) воздействие на прессованную термитную таблетку. Для реализации объемного нагружения частиц термитного состава необходимо устранить эффект динамической компрессии стальным поршнем и разбавить смесь частицами существенно большего размера. Это можно осуществить, например, при размещении композитных частиц активированного термитного состава среди крупных частиц порошка ВВ. Такие эксперименты были проведены для смеси термитного состава с порошком флегматизированного гексогена (частицы $100 \div 150$ мкм). В экспериментах использовали смеси ВВ/термитный состав

в массовом соотношении 20/80, 30/70, 40/60 и 50/50 %. Эти смеси насыпали в стеклянную трубку диаметром 8.5 мм и уплотняли до относительной плотности ≈ 0.75 . Высота заряда составляла 100 мм. Для иницирования детонации использовали заряды флегматизированного гексогена высотой 100 мм и плотностью ≈ 1.2 г/см³, помещенные в ту же трубку. Заряд гексогена детонировал со скоростью 6.53 км/с. В опытах регистрировались свечение фронта и разлет продуктов детонации. Результаты показали, что в первых трех составах формируется нормальная детонация со скоростями 5.7, 5.2 и 4.3 км/с соответственно. Иницирование смеси состава Al + CuO с гексогеном в пропорции 50/50 приводит к формированию детонационноподобного процесса с малой скоростью около 1.5 км/с. Характерный момент разлета продуктов детонации состава 40/60 представлен на рис. 12 в сравнении с фотографиями процесса детонации цилиндрических зарядов порошкообразного и водонаполненного гексогена.

На фотографиях отражены особенности свечения конусов разлета продуктов детонации. Разлет продуктов детонации порошкового гексогена (рис. 12,а) характеризуется однородно-зернистой структурой свечения, в которой проявляется равномерность распределения пор и частиц ВВ в заряде. В светлом конусе разлета продуктов детонации водонаполненного гексогена (рис. 12,б) присутствуют темные включения, обусловленные, видимо, наличием пара при вскипании водного компонента исходного заряда ВВ. Фотография разлета продуктов детонации смеси гексогена с тер-

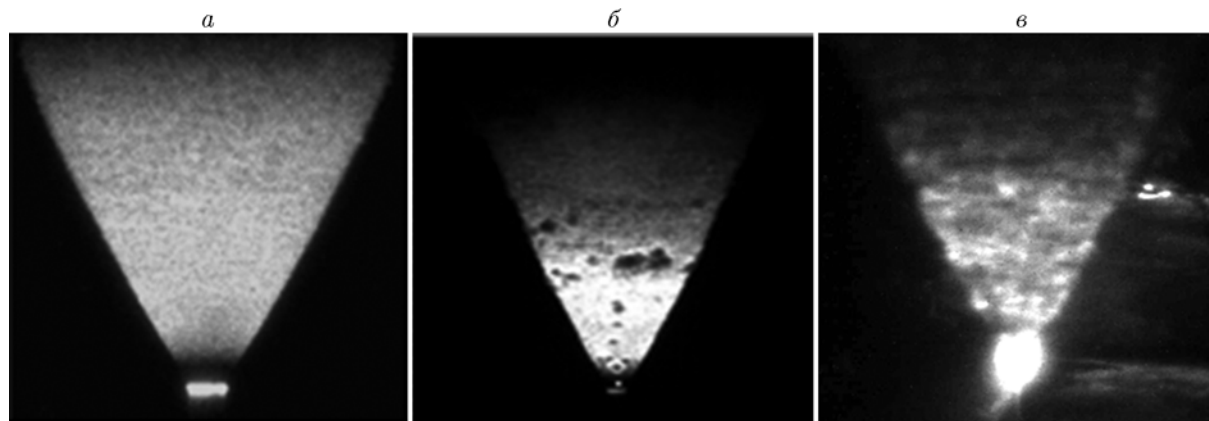


Рис. 12. Фотографии детонации цилиндрических зарядов:

a — порошковый гексоген (1.15 г/см^3); *б* — водонаполненный (20/80) порошок гексогена (1.2 г/см^3); *в* — смесь пиротехнического состава $\text{Al} + \text{CuO}$ с порошком гексогена в массовом соотношении 40/60

митным составом (рис. 12, *в*) заполнена яркими точками, связанными, очевидно, с локальным химическим энерговыделением в разлетающихся кластерах термитной смеси. Вершинные углы конуса разлета продуктов на рис. 12, *a–в* составляют 59 , 50 и 48° соответственно, что обусловлено разной плотностью дополнительных компонентов заряда.

Таким образом, установлено, что ударно-волновое нагружение термитного состава $\text{Al} + \text{CuO}$ приводит к инициированию горения как в случае плоского ударно-волнового нагружения, так и в продуктах взрыва.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получена количественная характеристика ударно-волнового инициирования и динамики горения смесей алюминия с оксидом меди: при времени ударного нагружения $1 \div 2 \text{ мкс}$ химическая реакция компонентов продолжается не менее $4 \div 5 \text{ мс}$.

2. Химическое взаимодействие компонентов при ударно-волновом нагружении протекает в основном в разлетающихся продуктах с образованием области свечения с яркостной температурой $\approx 3500 \text{ К}$.

3. По совокупности данных скоростного фотографирования, осциллограмм срабатывания электроконтактных датчиков и трековых отметок на тонких фольгах-отметчиках область свечения следует охарактеризовать как расширяющийся поток реагирующих кластеров и холодных компонентов смеси в облаке излучающей плазмы продуктов горения.

4. Иницирующим фактором химической реакции в потоке смеси порошков реакционно-способных компонентов после ударного нагружения прессованной таблетки являются разлетающиеся кластеры, переносящие первичные очаги химической реакции.

5. Продолжительность существования области свечения (химической реакции) обусловлена:

очаговым характером инициирования реакции при ударном нагружении;
 скоростью распространения реакции в контактной зоне компонентов;
 кластерным характером диспергирования прессованной таблетки;
 малым размером очага относительно площади контакта компонентов в кластере.

Иницирование термитного состава в смеси с детонирующим порошковым ВВ (гексоген) также сопровождается очаговым сгоранием в среде разлетающихся продуктов детонации.

Работа выполнена с использованием оборудования уникальной научной установки «Сфера» ОИВТ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев А. Ф. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. — М.: Наука, 1968.
2. Смирнов С. П., Колганов Е. В., Ильин В. П., Кулакевич Я. С., Смирнов А. С., Хворов Ф. Т. Разработка взрывчатых составов повышенной эффективности с удовлетворительными эксплуатационными характеристиками // V Харитоновские тематические на-

- учные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. — С. 231–232.
3. **Котомин А. А.** Эластичные взрывчатые материалы // Рос. хим. журн. — 1997. — Т. 41, № 4. — С. 89–101.
 4. **Боболев В. К., Карпухин И. А., Теселкин В. А.** О механизме возбуждения взрыва ударом в смесях перхлората аммония с горючими добавками // Физика горения и взрыва. — 1971. — Т. 7, № 2. — С. 261–264.
 5. **Гоголя М. Ф., Бражников М. А.** О характерных временах химических реакций в гетерогенных системах при динамическом нагружении // Хим. физика. — 1994. — Т. 13, № 11. — С. 88–101.
 6. **Герасимов С. И., Файков Ю. И., Холин С. А.** Кумулятивные источники света. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011.
 7. **Котомин А. А., Ефанов В. В., Душенков С. А., Козлов А. С., Трапезников М. А., Брешев Е. Н., Горовцов В. В.** Регулирование детонационной способности взрывчатых материалов, применяемых в системах разделения космических аппаратов // Вестн. НПО им. С. А. Лавочкина. — 2012. — Т. 13, № 2. — С. 12–18.
 8. **Анискин А. И.** Детонация смесей взрывчатых веществ с алюминием // Детонация и ударные волны. — Черногоровка: ИХФ РАН СССР, 1986. — С. 26–31.
 9. **Воскобойников И. М.** Окисление алюминия в ударных и детонационных волнах // Хим. физика. — 2009. — Т. 28, № 12. — С. 40–44.
 10. **Борисов А. А., Сулимов А. А., Сукоян М. К., Комиссаров П. В., Шамшин И. О., Ибрагимов Р. Х., Михайлов Ю. М.** Взрывные волны в открытом пространстве при неидеальной детонации высокоплотных смесевых составов, обогащенных алюминием // Хим. физика. — 2009. — Т. 28, № 11. — С. 59–68.
 11. **Fan Yang, Xiaoli Kang, Jiangshan Luo, Zao Yi, Yongjian Tang.** Preparation of core-shell structure $KClO_4@Al/CuO$. Nanoenergetic material and enhancement of thermal behavior // Scient. Rep. — 2017. — N 7, Article number: 3730. — DOI:10.1038/s41598-017-03683-z.
 12. **Долгобородов А. Ю., Стрелецкий А. Н., Махов М. Н., Колбанев И. В., Фортгов В. Е.** Взрывчатые составы на основе механоактивированных смесей металл — окислитель // Хим. физика. — 2007. — Т. 25, № 12. — С. 40–45.
 13. **Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К.** Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970.
 14. **Лобойко Б. Г., Любятинский С. Н.** Зоны реакции детонирующих твердых взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 6. — С. 45–64.
 15. **Долгобородов А. Ю., Кириленко В. Г., Стрелецкий А. Н., Колбанев И. В., Шевченко А. А., Янковский Б. Д., Ананьев С. Ю., Вальяно Г. Е.** Механоактивированный термитный состав Al/CuO // Горение и взрыв. — 2018. — Т. 11, № 3. — С. 103–113.
 16. **Голубев В. А., Вахрушев В. В., Пантуров Е. В., Гриневич Б. Е., Стриканов А. В., Усков А. А., Лактюшкин В. А., Козлов В. А., Демидов О. С., Уланова А. Л., Ярошенко В. В.** Поведение пиротехнического состава $AlCuO$ при ударно-волновом нагружении // III Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002. — С. 75–80.
 17. **Соловьев В. С.** Некоторые особенности ударно-волнового инициирования взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 6. — С. 65–76.
 18. **Дмитриева М. А.** Модель ударно-нагруженного реагирующего порошкового тела со структурой: автореф. доктор. дис. / ТГУ. — Томск, 2009.
 19. **Ananьев С. Ю., Dolgoborodov А. Y., Shiray А. А., Yankovsky В. D.** Shock initiation of exothermic reactions in mechanically activated mixtures // J. Phys.: Conf. Ser. — 2016. — V. 774, N 1. — P. 1–8. — DOI:10.1088/1742-6596/774/1/012069.
 20. **Пихтовников Р. В., Завьялов В. И.** Штамповка листового металла взрывом. — М.: Машиностроение, 1964.
 21. **Ananьев С. Ю., Yankovsky В. D., Dolgoborodov А. Y.** The combustion of $Al-CuO$ powder mixture under shock wave initiation of the reaction // J. Phys.: Conf. Ser. — 2018. — V. 946, N 1. — P. 1–7. — DOI:10.1088/1742-6596/946/1/012054.
 22. **Ананьев С. Ю., Долгобородов А. Ю., Янковский Б. Д.** Динамика разлета продуктов горения механоактивированной смеси алюминия с оксидом меди // Горение и взрыв. — 2017. — Т. 10, № 4. — С. 81–85.

Поступила в редакцию 18.12.2018.

После доработки 04.02.2019.

Принята к публикации 20.02.2019.