

УДК 536.46

ИЗУЧЕНИЕ ЗАЖИГАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ РЕАКЦИОННЫХ УДАРНИКОВ ПРИ УДАРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ТОПЛИВНЫМИ БАКАМИ

F. Y. Xu¹, H. F. Wang²¹Технологический институт Гуйчжоу, Гуйян 550003, Китай, xufengyue_bgc@163.com²Пекинский технологический институт, Пекин 100081, Китай, 925929253@qq.com

Экспериментально исследована зажигательная способность реакционных ударников, состоящих из политетрафторэтилена, алюминия и вольфрама, при ударном взаимодействии с топливными баками. В ходе баллистических экспериментов реакционные и стальные ударники вылетали с разной скоростью из гладкоствольной пороховой пушки и сталкивались с заполненным топливом баком. Весь процесс записывался высокоскоростной видеокамерой. Показано, что реакционные ударники обладают большей зажигательной способностью по сравнению со стальными ударниками. При попадании реакционного ударника в бак, заполненный топливом, воздействие оказывают как кинетическая энергия ударника, так и высвобождающаяся при ударе химическая энергия, что повышает вероятность воспламенения топлива. В частности, пламя, возникающее под воздействием реакционного ударника и выполняющее роль очага воспламенения, существует дольше и распространяется на большую область.

Ключевые слова: реакционный ударник, зажигательная способность, топливный бак, ударное воздействие, авиационный керосин.

DOI 10.15372/FGV20210313

ВВЕДЕНИЕ

Ударники из реакционных материалов (также называемые реакционными ударниками) — это новые энергетические поражающие элементы. Такие ударники обычно изготавливают путем холодного изостатического прессования и высокотемпературного спекания смеси металлических порошков (например, алюминия и вольфрама) и полимера [1, 2]. При столкновении с достаточной скоростью реакционного ударника с мишенью реакционный материал инициируется, запуская химическую реакцию. В результате мишень подвергается поражающему воздействию не только кинетической энергии ударника, но и высвобождающейся при ударе химической энергии. Это свойство реакционных материалов может оказаться полезным для повышения мощности боеголовки [3, 4].

Изучению реакционных материалов уделялось большое внимание. Множество ра-

бот посвящено исследованию их механических свойств, энерговыделения и поражающего эффекта [5–13]. Для определения параметров модели Джонсона — Кука были проведены эксперименты по квазистатическому сжатию реакционных материалов, а также по высокоскоростному деформированию на стержне Гопкинсона и стержне Тейлора [5]. Проанализировано влияние параметров реакционных материалов на их механический отклик, разрушение и характеристики ударного инициирования [6, 7]. Разработана и изготовлена специальная «вентилируемая» камера для измерения количества энергии, выделяющейся при столкновении реакционного ударника со стальной наковальной [9]. Для изучения влияния параметров материала, скорости удара и толщины мишени на характеристики энерговыделения проводились баллистические ударные эксперименты [8–10]. Экспериментально исследовалось поражающее воздействие реакционных ударников при столкновении с алюминиевой пластиной, системой из двух пластин (с промежутком между ними) и экранированными зарядами взрывчатых веществ [11–13].

Однако из-за сложной взаимосвязи процессов, происходящих при столкновении ударни-

© Xu F. Y.¹, Wang H. F.², 2021.¹School of Aerospace Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guizhou Guiyang 550003, China. ²State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China.

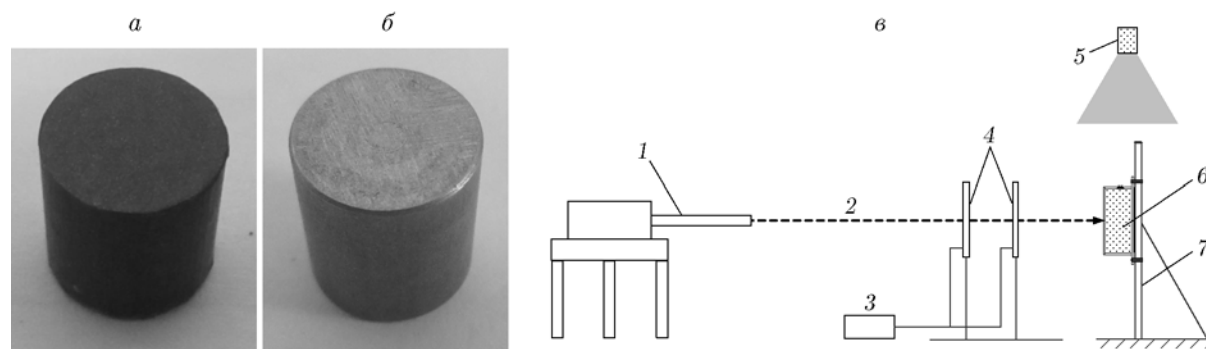


Рис. 1. Фотографии реакционного (*a*) и стального (*б*) ударников. Схема проведения экспериментов по баллистическому удару (*в*):

1 — баллистическая пушка, 2 — траектория полета ударника, 3 — электронный таймер, 4 — датчики скорости, 5 — высокоскоростная видеокамера, 6 — заполненный топливом бак, 7 — стенд для крепления мишени

ка с мишенью и последующем проникании в мишень, роль высвобождающейся при ударе химической энергии в повышении зажигательной способности ударника изучена недостаточно хорошо. В данной работе исследовалась зажигательная способность реакционных ударников при столкновении с топливными баками. Проведение экспериментов по баллистическому удару сочеталось с анализом воздействия, оказываемого давлением гидродинамического удара, а также с анализом воспламенения топлива. Полученные результаты могут быть использованы при анализе воспламенения авиационного керосина, а также при разработке боеприпасов, содержащих реакционные материалы.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

В экспериментах использовались реакционные ударники цилиндрической формы (рис. 1, *a*). Их плотность — 7.8 г/см^3 , диаметр и средняя длина — 10 мм. Ударники были изготовлены методом холодного изостатического прессования смеси порошков политетрафторэтилена (ПТФЭ), алюминия и вольфрама при давлении 200 МПа с последующим высокотемпературным спеканием в вакуумной печи. Состав исходной смеси был следующим (по массе): 11.3 % ПТФЭ, 7.5 % алюминия и 81.2 % вольфрама. Средний размер частиц ПТФЭ, алюминия и вольфрама составлял 100 нм, 44 и 44 мкм соответственно. В процессе спекания температура поддерживалась $\approx 380 \text{ }^\circ\text{C}$. Более подробное описание можно найти в работе [3]. Для сравнения были проведены эксперименты со стальными ударниками той

же плотности и тех же средних размеров (см. рис. 1, *б*).

Схема проведения экспериментов по изучению ударного взаимодействия ударников с топливным баком представлена на рис. 1, *в*. Экспериментальная установка состояла из баллистической пушки, стенда для крепления мишени, топливного бака, датчиков скорости, высокоскоростной видеокамеры и некоторых других элементов. Расстояние от баллистической пушки (калибром 12.7 мм) до топливного бака составляло 9 м. Расстояние между датчиками скорости и топливным баком — 450 мм. Топливные баки были сварены из шести пластин толщиной 6 мм, изготовленных из алюминиевого сплава 2024-T3, средний размер пластин $188 \times 188 \times 100 \text{ мм}$. Баки заполняли авиационным керосином RP-3. Ударник, помещенный в нейлоновый поддон, запускался из гладкоствольной пороховой пушки, и с помощью датчиков измерялась его скорость. Процесс столкновения ударника с топливным баком записывался высокоскоростной видеокамерой.

Результаты экспериментов по ударному взаимодействию ударников с топливным баком приведены в таблице. При скорости реакционных ударников до 953 м/с топливные баки повреждались (в большей или меньшей степени), но авиационный керосин при этом не воспламенялся. При скорости выше 1 022 м/с повреждения топливного бака были значительными и сопровождалась воспламенением авиационного керосина. Видно, что вероятность воспламенения топлива сильно зависит от скорости ударника.

При столкновении стальных ударников

Результаты экспериментов

Номер эксперимента	Тип ударника	Скорость удара, м/с	Описание результатов
1	Реакционный	813	Незначительное повреждение топливного бака, авиационный керосин воспламенить не удалось
2	Реакционный	821	
3	Реакционный	949	Более существенное повреждение топливного бака, авиационный керосин воспламенить не удалось
4	Реакционный	953	
5	Реакционный	1 102	Значительное повреждение топливного бака, авиационный керосин успешно воспламенился
6	Реакционный	1 121	
7	Стальной	1 142	Значительное повреждение топливного бака, авиационный керосин воспламенить не удалось
8	Стальной	1 407	

с топливными баками со скоростью 1 142 и 1 407 м/с повреждения баков также были серьезными, но авиационный керосин при этом не воспламенялся. Это означает, что зажигательная способность реакционного ударника выше, чем стального ударника тех же размеров и той же плотности.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

2.1. Воздействие гидродинамического удара при столкновении инертного ударника с топливным баком

В данной работе анализ влияния параметров удара на прогиб стенки топливного бака при ударе и пробивании проводился на основе воздействия, оказываемого давлением гидродинамического удара. Как показано в работе [14], прогиб можно описать уравнением

$$\delta_n = A' \frac{\bar{p}_n \cdot \Delta \bar{t}}{\rho h}, \quad (1)$$

где δ_n — прогиб передней стенки топливного бака, A' — константа, \bar{p}_n — среднее давление, $\Delta \bar{t}$ — эффективное время действия давления, h — толщина стенки, ρ — плотность материала стенки.

Согласно работе [14] пиковое значение ударного давления пропорционально квадрату скорости удара:

$$p_{n,\max} = C v_0^2, \quad (2)$$

где C — константа, v_0 — скорость ударника в момент столкновения.

Кроме того, установлено, что импульсы давления имеют приблизительно треугольную форму [14]. Объединяя уравнения (1) и (2), прогиб стенки можно представить в виде

$$\delta_n = \frac{B v_0^2}{\rho h} \cdot \Delta \bar{t}, \quad (3)$$

где B — константа. Эффективное время действия давления можно оценить следующим образом [14]:

$$\Delta \bar{t} = B' \frac{L}{v_0}, \quad (4)$$

где L — длина ударника.

Подставляя (4) в уравнение (3), получаем для прогиба стенки следующее выражение:

$$\delta_n = \frac{D v_0 L}{\rho h}, \quad (5)$$

где D — новая константа. Уравнение (5) показывает, что при заданных параметрах ударника и топливного бака прогиб стенки бака и скорость удара связаны линейно. Поэтому при росте скорости удара прогиб тоже увеличивается. Другими словами, скорость удара должна быть достаточно высокой, чтобы прогиб превысил критическое значение и произошел разрыв стенки топливного бака.

2.2. Воспламенение топлива

Согласно работе [15] критерий воспламенения авиационного керосина можно записать в виде

$$t_{ign} = A \exp\left(\frac{E}{T^* R}\right) p^{-n}, \quad (6)$$

где t_{ign} — время задержки воспламенения, A — предэкспоненциальный множитель, E — энергия активации, p — давление, R — универсальная газовая постоянная, T^* — температура, n — порядок реакции. Для использованного в экспериментах авиационного керосина RP-3 $A = 1.68 \cdot 10^{-8}$ мс·атм², $E = 37.78$ ккал/моль, $n = 2$ [15].

Рис. 2 иллюстрирует влияние температуры и давления на время задержки воспламенения. При заданном давлении время задержки уменьшается при повышении температуры, постепенно снижаясь до нуля. С другой стороны, при $T < 800$ К время задержки воспламенения уменьшается при увеличении давления. Однако при $T > 800$ К время задержки при изменении давления изменяется незначительно. В общем случае для успешного воспламенения авиационного керосина при заданном давлении эффективная длительность воздействия температуры должна превышать соответствующее время задержки воспламенения.

При столкновении ударника со стенкой топливного бака и ее пробивании повышаются давление и температура, что приводит к распылению авиационного керосина и, как следствие, к образованию топливовоздушной смеси. При определенных концентрациях топлива и наличии большого очага воспламенения топливовоздушная смесь может воспламениться. В частности, согласно работе [15] воспламенение смеси происходит в следующем диапазоне концентраций авиационного керосина RP-3: $0.6 \leq X \leq 4.7$ %.

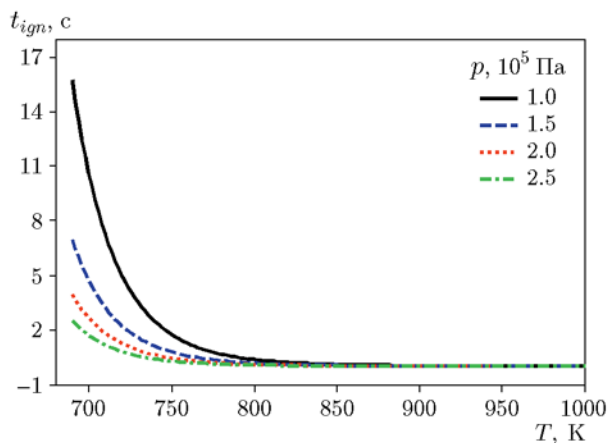


Рис. 2. Влияние температуры и давления на время задержки воспламенения авиационного керосина RP-3 (средняя концентрация топлива в топливовоздушной смеси ≈ 2.65 % [15])

2.3. Зажигательная способность реакционного ударника при столкновении с топливным баком

При определенных скоростях, когда реакционный ударник врывается в заполненный топливом бак, инициирование материала ударника вызывает дефлаграцию. В результате к поражающему действию кинетической энергии ударника добавляется поражающее действие запасенной в нем химической энергии. Если учесть, что пиковые значения ударного давления пропорциональны квадрату скорости удара [14], можно записать следующее выражение для прогиба передней стенки топливного бака, в которую врывается реакционный ударник:

$$\delta_r = K_1 \frac{v_0^2 \cdot \Delta \bar{t}_1}{\rho h} + K_2 \frac{\bar{p}_2 \cdot \Delta \bar{t}_2}{\rho h}. \quad (7)$$

Здесь $\Delta \bar{t}_1$ — эффективное время действия ударного давления, $\Delta \bar{t}_2$ — эффективное время действия дефлаграционного давления, \bar{p}_2 — среднее давление, вызванное процессом дефлаграции, K_1 и K_2 — константы, определяемые материалом пластины.

Уравнения (5) и (7) показывают, что при столкновении реакционного ударника с баком, заполненным топливом, возникает комбинированный поражающий эффект: к воздействию кинетической энергии ударника добавляется воздействие дефлаграции. В том же случае, когда в заполненный топливом бак врывается инертный металлический ударник, поражающий эффект зависит только от кинетической энергии ударника. Поэтому при одинаковых скоростях и массах ударников прогиб стенки бака, вызванный ударом реакционного ударника, значительно больше образовавшегося под действием инертного ударника, что в итоге и приводит к повышению вероятности разрыва топливного бака. Вероятность воспламенения топлива при этом также увеличивается. Другими словами, при идентичных условиях соударения зажигательная способность реакционного ударника значительно выше зажигательной способности инертного металлического ударника (той же массы и тех же размеров), что согласуется с результатами работы [11]. Увеличение скорости удара приводит к постепенному усилению воздействия, оказываемого ударным и дефлаграционным давлением. Прогиб передней стенки топливного бака при этом увеличивается, что в какой-то момент приводит к

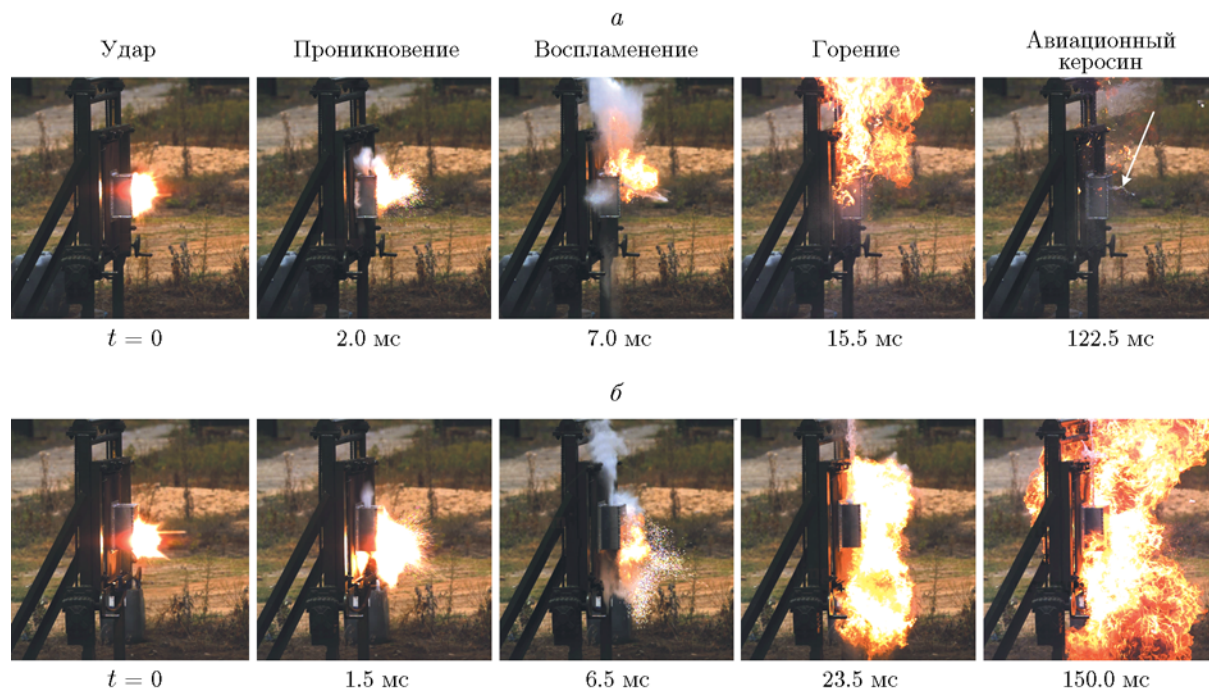


Рис. 3. Типичные кадры процесса ударного взаимодействия реакционного ударника с топливным баком со скоростью 949 (а) и 1102 м/с (б)

образованию трещин на стыках пластин бака. На последней стадии процесса топливный бак разрывается и авиационный керосин воспламеняется.

В общем случае поражающее воздействие реакционного ударника на топливный бак можно описать следующим образом. Сначала ударная волна, образовавшаяся при столкновении ударника с передней стенкой бака, распространяется вперед по стенке и авиационному керосину. При этом на сварочных швах из-за наложения ударных волн концентрируются напряжения. Затем реакционный ударник проникает в переднюю стенку бака. В результате движения ударника и протекания дефлаграции образуется полость. Полость расширяется, а прогиб стенки увеличивается. Однако следует отметить, что пробивная способность реакционного ударника, как правило, ниже, чем у стального ударника [3]. Кроме того, в случае реакционного ударника возможна большая потеря массы при столкновении и проникании в пластину.

На рис. 3 приведены типичные кадры высокоскоростной видеосъемки процесса ударного взаимодействия реакционных ударников с топливными баками. Время отсчитывалось от мо-

мента столкновения ударника с передней стенкой топливного бака ($t = 0$). Скорость удара реакционного ударника оказывает существенное влияние на воспламенение топлива. Как показано на рис. 3,а, при попадании реакционного ударника в топливный бак со скоростью 949 м/с топливо, расплывшееся вокруг бака, воспламеняется в момент времени $t = 7$ мс. Однако из-за не очень значительного повреждения топливного бака и ограниченного количества расплывшегося керосина, вспыхнувшая пламя гаснет в момент времени $t = 122.5$ мс, и в дальнейшем топливо уже не воспламеняется. Как видно на рис. 3,б, когда реакционный ударник врезается в топливный бак со скоростью 1102 м/с, авиационный керосин воспламеняется. Вероятные причины такого поведения следующие. При росте скорости ударника повышается его кинетическая энергия, а также интенсифицируется процесс дефлаграции [3, 8]. Это значит, что оба слагаемых в уравнении (7) увеличиваются, т. е. стенка прогибается сильнее. В результате топливный бак повреждается сильнее, что приводит к тому, что большее количество авиационного керосина выбрасывается из бака и распыляется. Другими словами, в этом случае авиационный керосин (т. е. нахо-

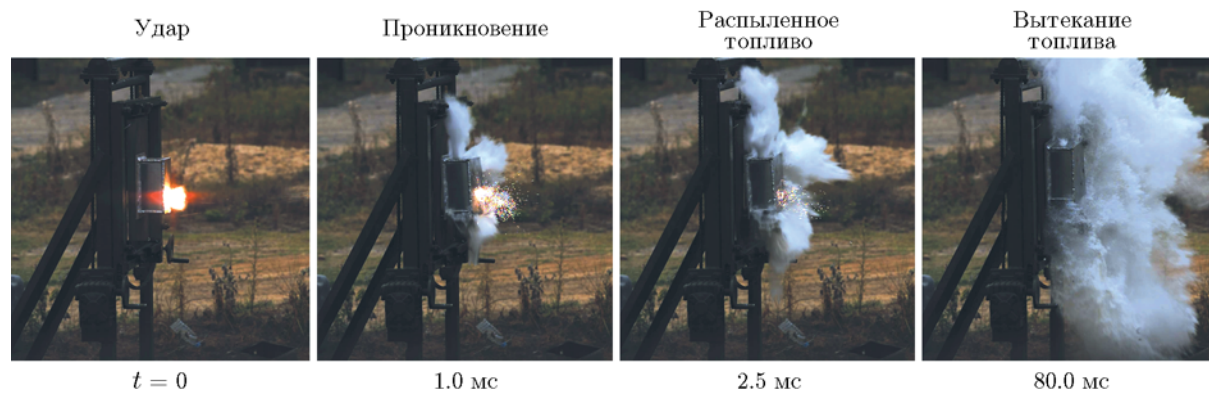


Рис. 4. Типичные кадры процесса ударного взаимодействия стального ударника с топливным баком

дящееся в баке топливо) воспламеняется легче.

В общем случае для возникновения горения необходимо наличие горючего вещества, окислителя (например, кислорода) и очага воспламенения. Экспериментальные результаты показывают, что очаги воспламенения, создаваемые реакционным и стальным ударниками, существенно отличаются. На рис. 4 приведены типичные кадры процесса ударного взаимодействия стального ударника с топливным баком. При попадании стального ударника в топливный бак со скоростью 1407 м/с бак серьезно повреждается и при этом распыляется больше авиационного керосина. Однако пламя, возникающее при ударе, гаснет в момент времени $t = 2.5$ мс, так как распыленное топливо не успевает вовремя подхватить пламя. Другими словами, в этом случае не возникает эффективного очага воспламенения. В случае же реакционного ударника при его столкновении и проникании в стенку происходит инициирование материала ударника, что вызывает дефлаграцию. Поэтому пламя, возникающее при ударе, распространяется дальше и существует дольше (см. рис. 3,б), что обеспечивает надежный очаг для воспламенения распыленного авиационного керосина. В результате вероятность воспламенения топлива увеличивается.

ВЫВОДЫ

Для изучения зажигательной способности реакционных ударников при столкновении с топливными баками выполнены эксперименты по баллистическому удару, а также проведен соответствующий теоретический анализ. Экспериментальные результаты показывают, что при скорости реакционного ударника 1102 и

1121 м/с авиационный керосин RP-3 воспламенялся при ударе по нормали к поверхности топливного бака. Однако при использовании стальных ударников со скоростями 1142 и 1407 м/с авиационный керосин не воспламенялся. Это означает, что зажигательная способность реакционных ударников при столкновении с топливными баками значительно отличается от зажигательной способности стальных ударников. Такое отличие обусловлено тем, что, с одной стороны, при столкновении реакционного ударника с топливным баком достигается комбинированное поражающее воздействие кинетической энергии ударника и высвобождающейся при ударе химической энергии. Это вполне может увеличить повреждение бака и привести к вытеканию, выбросу и распылению авиационного керосина. С другой стороны, при использовании реакционных ударников пламя, возникающее при ударе, существует дольше и распространяется дальше, чем в случае стальных ударников. Поэтому реакционные ударники обеспечивают надежный очаг воспламенения, что отражается на их высокой зажигательной способности. Результаты, полученные в данной работе, могут быть полезны при анализе воспламенения заполненных топливом баков. Однако в будущем еще предстоит проделать большую работу, чтобы разработать математическую модель и описать механизм воспламенения количественно.

Исследование поддержано National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11902087), the Start-up Funds for High-level Personnel Research of the Guizhou Institute of Technology (Grant No. XJGC20190957), the Creative Research Groups Program of Guizhou Educatio-

nal Commission (Grant [2018]026) and the Engineering Research Centres of Guizhou Ordinary Institution of Higher Education (Grant [2018]007).

Конфликт интересов отсутствует.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Martinez H., Zheng Z. Y., Dolbier W. R., Jr.** Energetic materials containing fluorine. Design, synthesis and testing of furazan-containing energetic materials bearing a pentafluoro-sulfanyl group // *J. Fluorine Chem.* — 2012. — V. 143. — P. 112–122. — <https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2012.03.010>.
2. **Cai J.** Properties of heterogeneous energetic materials under high strain, high strain rate deformation: Ph. D. Thesis / Univ. of California. — San Diego, USA, 2007. — <http://escholarship.org/uc/item/71166051>.
3. **Xu F. Y., Zheng Y. F., Yu Q. B., Wang Y. Z., Wang H. F.** Experimental study on penetration behavior of reactive material projectile impacting aluminum plate // *Int. J. Impact Eng.* — 2016. — V. 95. — P. 125–132. — <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.05.007>.
4. **Wang Y. Z., Yu Q. B., Zheng Y. F., Wang H. F.** Formation and penetration of jets by shaped charges with reactive material liners // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2016. — V. 41. — P. 618–622. — <https://doi.org/10.1002/prop.201500298>.
5. **Raftenberg M. N., Mock W., Jr, Kirby G. C.** Modeling the impact deformation of rods of a pressed PTFE/Al composite mixture // *Int. J. Impact Eng.* — 2008. — V. 35, N 12. — P. 1735–1744. — <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.07.041>.
6. **Reeves R. V., Mukasyan A. S., Son S. F.** Transition from impact-induced thermal runaway to prompt mechanochemical explosion in nanoscaled Ni/Al reactive systems // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2013. — V. 38, N 5. — P. 611–621. — <https://doi.org/10.1002/prop.201200193>.
7. **Mock W., Jr, Drotar J. T.** Effect of aluminum particle size on the impact initiation of pressed PTFE/Al composite rods // *AIP Conf. Proc.* — 2007. — V. 955, N 1. — P. 971–974. — <https://doi.org/10.1063/1.2833292>.
8. **Xu F. Y., Geng B. Q., Zhang X. P., Xiao J. G., Wang H. F.** Experimental study on behind-plate overpressure effect by reactive material projectile // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2017. — V. 42, N 2. — P. 192–197. — <https://doi.org/10.1002/prop.201600086>.
9. **Ames R. G.** Vented chamber calorimetry for impact initiated energetic materials // *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.* — 2005. — AIAA 2005-279. — P. 279–292. — <https://doi.org/10.2514/6.2005-279>.
10. **Luo P. G., Wang Z. C., Jiang C. L., Mao L., Li Q.** Experimental study on impact-initiated characters of W/Zr energetic fragments // *Mater. Des.* — 2015. — V. 84, N 5. — P. 72–78. — <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.107>.
11. **Wang H. F., Zheng Y. F., Yu Q. B., Liu Z. W., Yu W. M.** Experimental research on igniting the aviation kerosene by reactive fragment // *Acta Armamentarii.* — 2012. — V. 33, N 9. — P. 1148–1152.
12. **Sorensen B.** High-velocity impact of encased Al/PTFE projectiles on structural aluminum armor // *The 13th Hypervelocity Impact Symposium, Procedia Engineering.* — 2015. — V. 103. — P. 569–576. — <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.04.074>.
13. **Vine T., Stubberfield J., Jobson D., Kirkpatrick D., McLean S.** Penetration and ignition performance of reactive fragments // *29th Int. Symp. on Ballistics.* — 2016. — P. 1847–1853.
14. **Rosenberg Z., Bless S. J., Gallagher J. P.** A model for hydrodynamic ram failure based on fracture mechanics analysis // *Int. J. Impact Eng.* — 1987. — V. 6, N 1. — P. 51–61. — [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(87\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0734-743X(87)90006-6).
15. **Zheng Y. F.** Research on enhanced lethality effects and mechanisms of reactive materials: Ph. D. Thesis / Beijing Inst. of Technology. — China, 2012.

Поступила в редакцию 28.04.2020.

После доработки 31.08.2020.

Принята к публикации 03.09.2020.