

03

Особенности разрушения гомогенных и композиционных преград при высокоскоростном взаимодействии со стержневыми ударниками

© В.М. Захаров, А.Н. Табаченко, С.А. Афанасьева

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета,
634050 Томск, Россия
e-mail: zakharov_vm@list.ru

(Поступило в Редакцию 21 ноября 2016 г.)

Экспериментально исследуется разрушение гомогенных и композиционных, имеющих средний металлокерамический слой, преград при взаимодействии с ударниками из сплава ВНЖ-90. Сравнимость результатов для разных типов преград обеспечивалась на основе весовой эквивалентности — равенства веса по толщине для единицы площади преграды. Начальная скорость взаимодействия — от 0.8 до 1.1 km/s. Высокоскоростной кинокамерой осуществлялась регистрация процесса от момента подхода ударника до формирования развитого осколочного потока за преградой. Обработкой кинограмм построены зависимости „перемещение—время“ для характерных плоскостей мишенной обстановки — заднего торца ударника, тыльной поверхности преграды. Анализ этих зависимостей позволил выявить особенности разрушения преград. Отмечены сильные различия в геометрии зон разрушения и динамике процесса для монолитных и композиционных преград.

DOI: 10.21883/JTF.2017.07.44669.2106

Введение

В конструкциях изделий, подвергаемых интенсивным ударным нагрузкам, активно используются различные композиционные материалы с повышенными прочностными характеристиками. Подобные конструкции могут использоваться в качестве как средств поражения, так и средств защиты. Важным направлением исследований является анализ разрушений конструкций с композиционными материалами в практически значимых условиях ударных нагрузок [1,2]. Для таких условий наиболее достоверны экспериментальные данные по испытаниям конкретных конструктивных схем изделий.

Целью настоящей работы является исследование характера разрушения преград при высокоскоростном ударном взаимодействии высокоплотных стержневых ударников с гомогенными стальными и составными преградами, содержащими между стальными слоями металлокерамический слой.

Методика эксперимента

Эксперимент проводился с ударниками, изготовленными из сплава ВНЖ-90 в состоянии поставки. Диаметр ударника $d_0 = 5.0$ mm, длина — $5d_0$. Устойчивость ударников на траектории обеспечивалась с помощью конического стабилизатора, изготовленного из алюминиевого сплава Д16. Ведение по каналу ствола пороховой баллистической установки калибром 13.2 mm (ПБУ-13) осуществлялось с помощью отделяемого поддона толкающего типа. Ведущие секторы поддона изготавливались из капрлона, разрезной толкающий диск — из Д16.

Опыты проводились по преградам двух типов: гомогенным и композиционным. Гомогенная преграда — диск из стали 45 толщиной $b = 12.4$ mm $= 2.48d_0$, диаметр диска 60 mm. Композиционная преграда — сборка из трех дисков: $(b_1 + b_2 + b_3) = 3d_0$. Диски b_1 и b_3 изготавливались из того же прутка стали 45 толщиной $b_1 = b_3 = d_0$. Средний слой сборки представлял собой пластину из керамики ($TiB_2 + V_4C$) с металлической связующей. Толщина среднего слоя также $b_2 = d_0$.

Композиционный металлокерамический материал на основе диборида титана и карбида бора ($TiB_2 + V_4C$) с металлической связующей был получен методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) с применением деформационного компактирования конечных продуктов реакции. В качестве экзотермических компонент использовали поликристаллический бор и титан марки ПТМ. Плотность металлокерамики составляла 3.81 g/sm³. Свойства исследуемой металлокерамики изучались в работе [3]. Конечные размеры защитных плиток достигались путем шлифовки СВС заготовок алмазным инструментом.

Соприкасающиеся поверхности всех дисков шлифовались и жестко стягивались болтами по наружному контуру дисков. В каждую сборку производился один опыт. Эквивалентность по весу выражалась условием $[b = 2.4$ mm]_{ст45} = $[b_2 = 5$ mm]_{composit}. То есть гомогенная и композиционная преграды имели одинаковый вес по толщине (на единицу площади), что позволяло производить сравнительный анализ стойкости преград.

Скорость ударников определялась индукционным измерителем с погрешностью не более 0.2%. В качестве согласующе-формирующего устройства и устройства синхронизации запуска регистрирующей аппарату-

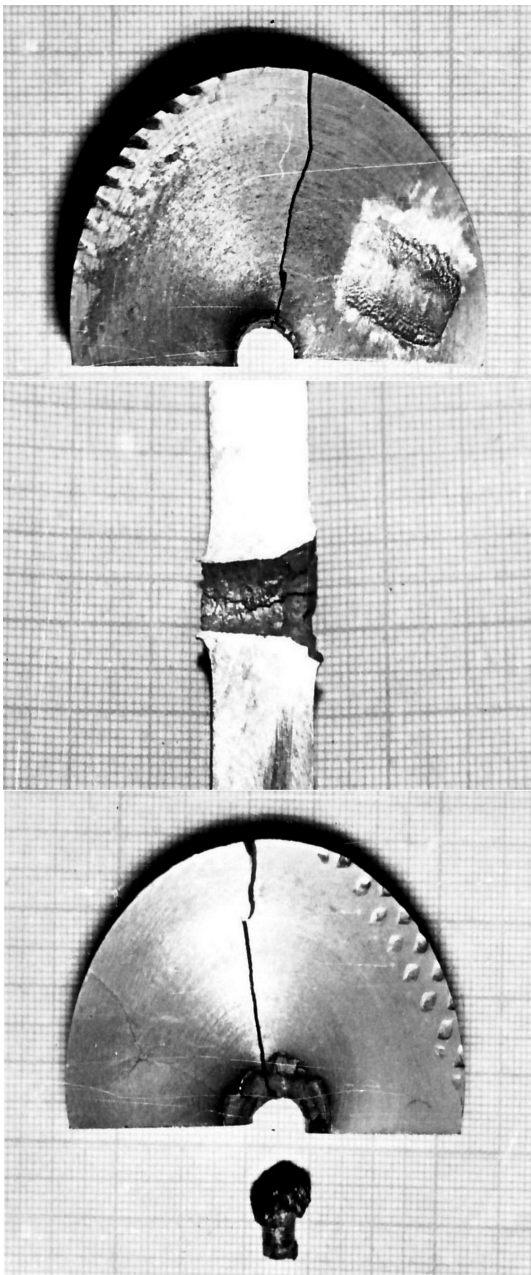


Рис. 1. Гомогенная преграда после взаимодействия с высокоплотным ударником при скорости 1061 м/с: сверху вниз — лицевая поверхность преграды, осевой разрез пробоины, тыльная поверхность преграды и остаток ударника.

ры использовался специально разработанный прибор. Регистрация динамики процесса проникания и пробития осуществлялась камерой ЖЛВ-2. Камера находилась вне зоны ПБУ-13 и наводилась на область регистрации с помощью поворотного зеркала. Расшифровка изображений на фотопленке производилась с помощью реперов, которые представляли собой цилиндры малого диаметра определенной длины; обычно реперы располагались в плоскости стрельбы соосно на лицевой и тыльной поверхностях преграды.

Характер разрушения преград

Анализ сборок после опытов показал, что характер разрушения гомогенной и композиционной преград различен. На рис. 1 представлены фотографии гомогенной преграды после пробития ее ударником. На рис. 2 приведены фрагменты композиционной преграды.

Результаты эксперимента показали, что практически при одной и той же скорости удара (~ 1070 м/с) срабатывание ударника на гомогенной и композиционной преградах получается близким: длина остатка ударника равна $2.20d_0$ и $2.24d_0$ для гомогенной и композиционной преград соответственно. Лицевое разрушение на преградах также является одинаковым: входной диаметр пробоины равен $1.64d_0$ в обоих случаях. Разрушение же тыльных поверхностей преград существенно различно. Для наглядности профиль пробоин в обеих преградах реконструирован графически и показан на рис. 3.

Различия наблюдаются уже в геометрии пробоин первого слоя: так, диаметр пробоины на уровне его тыльной поверхности составляет $3d_0$ для гомогенной и $1.8d_0$ для композиционной преград. Во всех случаях пробитие гомогенной преграды происходит с образованием откола, в то время как в первом слое композиционной преграды откол не образуется. В этом проявляется эффект слоистости композиционной преграды: перераспределение давления на фронте волны сжатия на границе слоев

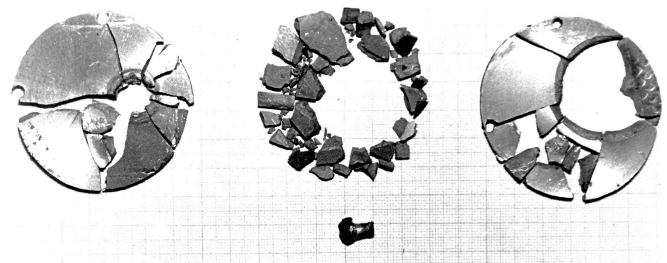


Рис. 2. Композиционная преграда после взаимодействия с высокоплотным ударником при скорости 1073 м/с: слева направо — тыльная поверхность первого стального слоя, осколки второго керамического слоя и остаток ударника, тыльная поверхность третьего стального слоя.

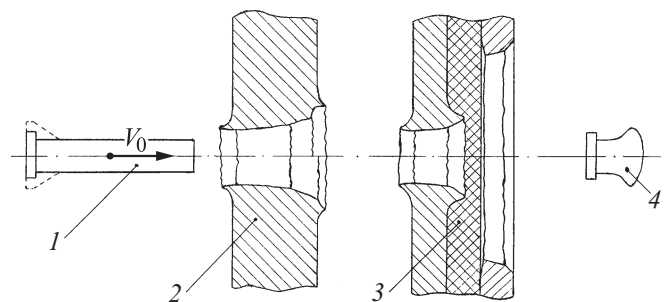


Рис. 3. Геометрия разрушения преград: 1 — исходная геометрия ударника, 2 — гомогенная преграда, 3 — композиционная преграда, 4 — конечная геометрия ударника.

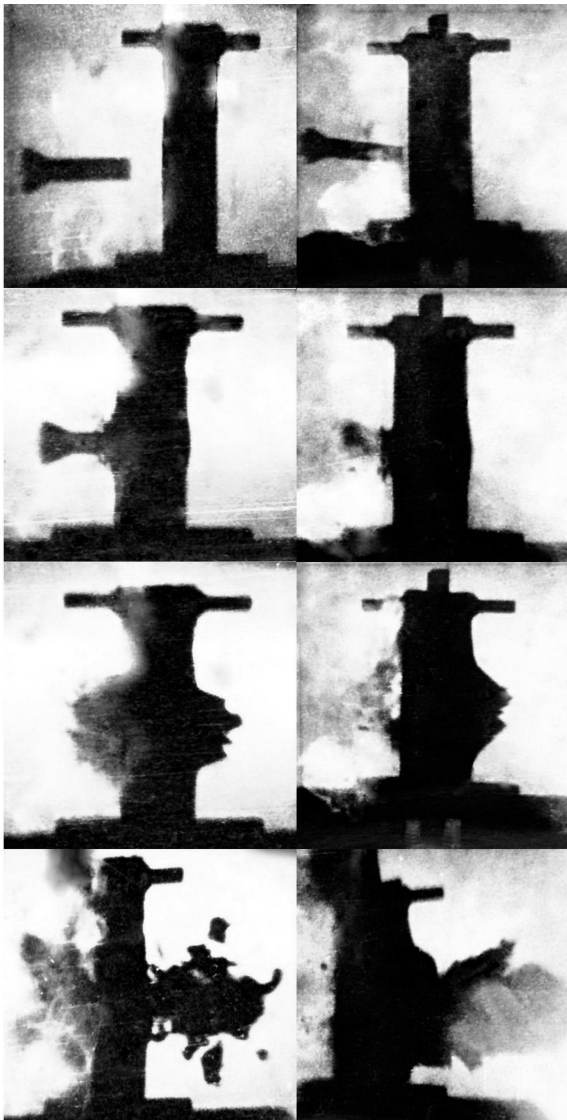


Рис. 4. Кадры киносъемки процесса взаимодействия высокоплотного ударника с преградами в различные моменты времени от начала соударения. Левый ряд — гомогенная преграда, сверху вниз, μs : (–8.3), 12.1, 32.5, 85.1; правый ряд — композиционная преграда, сверху вниз, μs : (–1.8), 12.8, 33.1, 82.4.

снижает интенсивность волны разгрузки в первом слое и откол не образуется.

Разрушение третьего стального слоя композиционной преграды носит характер „пролома“ и имеет значительные размеры: входной диаметр составляет $\sim 6d_0$, а выходной $\sim 7d_0$. Средний керамический слой хрупко разрушается (раскалывается) примерно в этом же объеме и его осколки составляют основную часть запреградного потока.

Катастрофический характер разрушения третьего слоя сборки есть следствие совместного воздействия на него движущегося ударника и осколков раскалывающегося керамического слоя. Отсюда следует, что для повышения

защитных свойств композиционной преграды необходимо обеспечивать стойкость третьего слоя: увеличивать его толщину, использовать более пластичные материалы, придавая ему свойство основного защитного элемента конструкции.

Анализ динамики процесса соударения

На рис. 4 показан ряд кинокадров взаимодействия ударника с гомогенной и композиционной преградами. Обработкой данных высокоскоростной кинорегистрации были построены диаграммы $x(t)$, где x — перемещение, t — время. Анализировались подход ударника, движение его заднего торца при внедрении и развитие тыльного купола при пробитии преград.

На рис. 5 и 6 представлены графические зависимости для гомогенной и композиционной преград при нескольких начальных скоростях взаимодействия V_0 . На рисунках обозначено положение начала координат в мишенной обстановке.

Графики показывают, что зависимости $x(t)$ для обоих типов преград подобны. Некоторую особенность можно отметить для торможения ударника: в случае гомогенной преграды движение заднего торца ударника при его внедрении происходит примерно с постоянной скоростью V , что подтверждает известную гипотезу об определяющем вкладе стационарной фазы в процессе

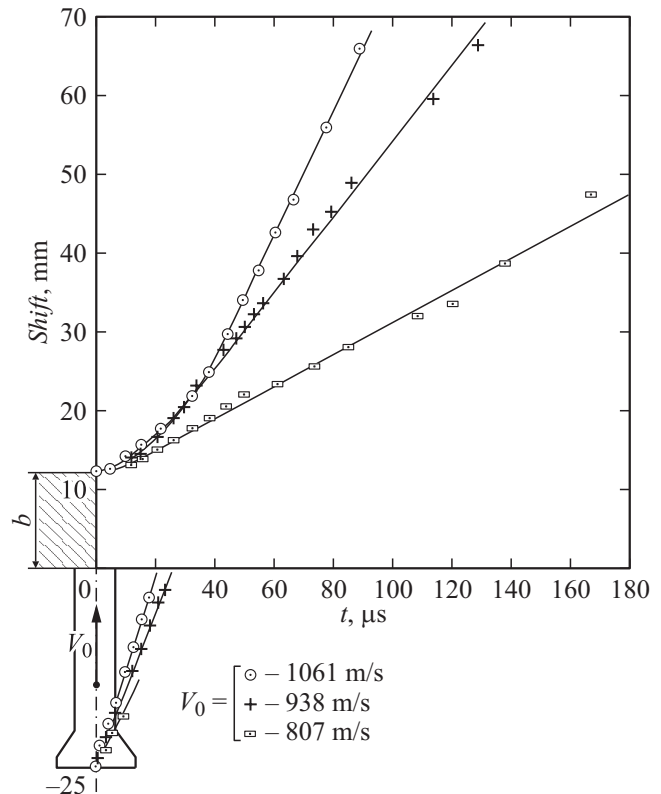


Рис. 5. Зависимости перемещений заднего торца ударника и тыльной поверхности гомогенной преграды от времени для различных начальных скоростей удара.

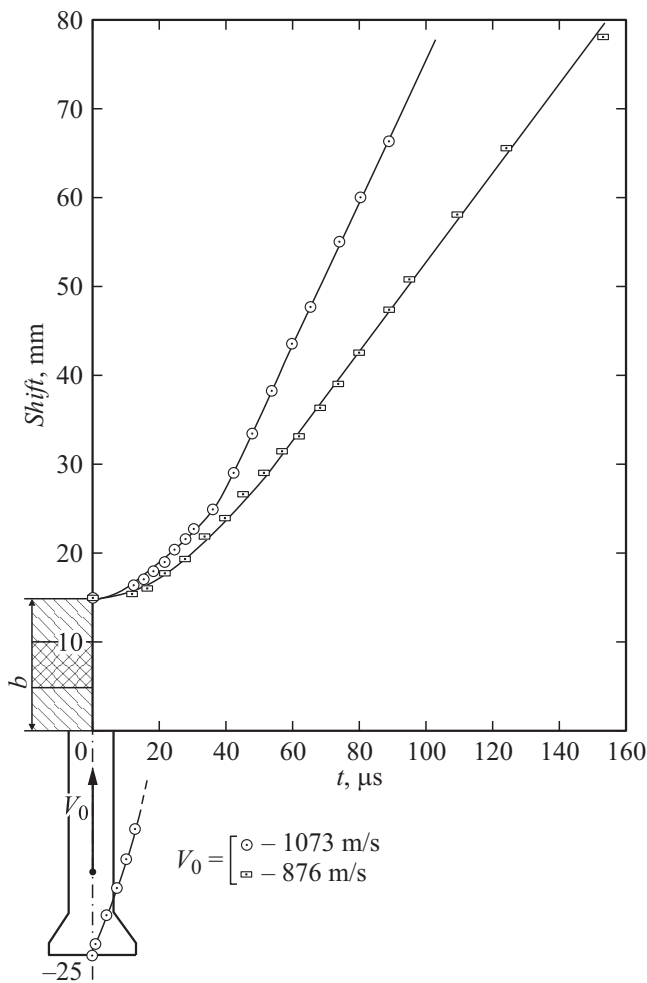


Рис. 6. Зависимости перемещений заднего торца ударника и тыльной поверхности композиционной преграды от времени для различных начальных скоростей удара.

проникания удлиненного ударника. Причем эта скорость находится в прямой зависимости от начальной скорости удара V_0 : чем больше V_0 , тем больше и V .

В случае же композиционной преграды зависимость $x(t)$ для торца ударника имеет несколько иной вид. Эта зависимость нелинейная и обращена выпуклостью к оси t . То есть скорость заднего торца ударника в процессе проникания несколько возрастает. Эффект этот выражен не очень ярко, но заметен. Объяснение этого связано с воздействием ударника на жесткий средний керамический слой преграды: с одной стороны, это взаимодействие достаточно пластичного ударника с жесткой преградой, а с другой — это совместное по ходу движение системы „ударник–керамика“, приводящее к разрыву мягкого тыльного слоя сборки.

Движение тыльного купола при пробитии преград более наглядно можно оценить по зависимостям „перемещение–скорость удара“, построенным для фиксированных моментов времени от начала соударения. Эти графики для $t = 60$ и $90 \mu s$ приведены на рис. 7.

Графики показывают, что перемещение тыльного купола для монолитной преграды имеет более сильную зависимость от начальной скорости удара, чем для композиционной. При низких скоростях удара ($V_0 \leq 1000$ m/s) перемещение потока за композиционной преградой более значительное, чем за монолитной, однако при $V_0 \geq 1100$ m/s картина меняется на противоположную.

По кинограммам были сделаны оценки скорости запреградных потоков V_s в фазе их развитого движения ($t = 60-90 \mu s$).

Характер зависимостей $V_s(V_0)$ подобен графикам на рис. 7, а именно с ростом V_0 скорость потока сильно возрастает, причем в большей степени для гомогенной преграды; так, при увеличении V_0 с 850 до 1050 m/s, т. е.

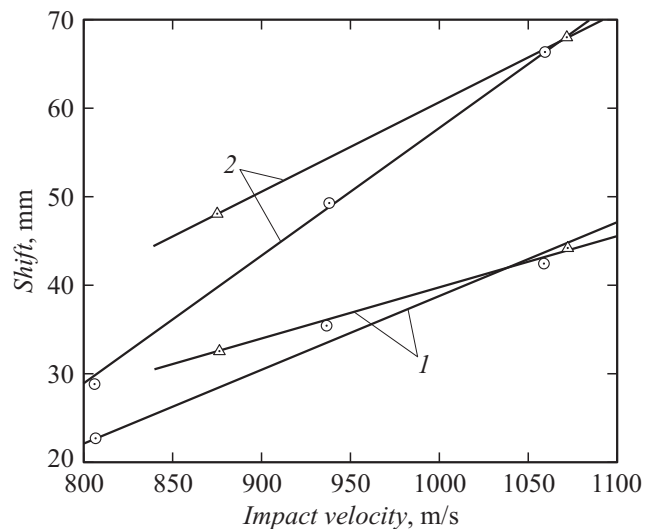


Рис. 7. Зависимость перемещения тыльного купола от начальной скорости удара в различные моменты времени от начала взаимодействия: 1 — $60 \mu s$, 2 — $90 \mu s$; \odot — гомогенная преграда, \triangle — композиционная преграда.

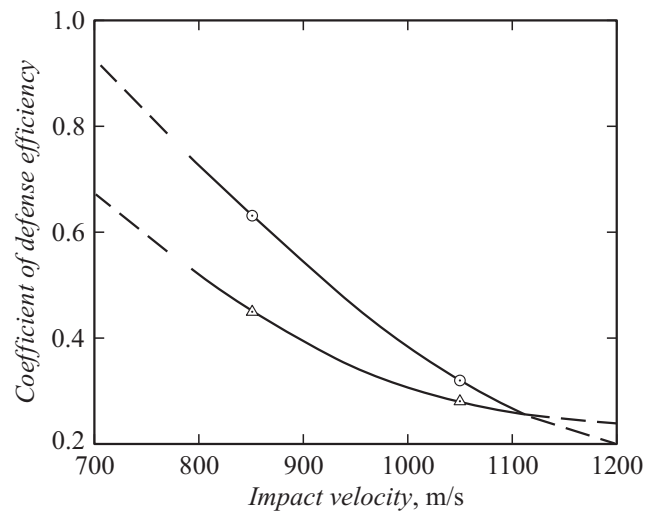


Рис. 8. Зависимость коэффициента эффективности защиты от начальной скорости удара: \odot — гомогенная преграда, \triangle — композиционная преграда.

при увеличении на $\sim 24\%$, скорость потока возросла на $\sim 140\%$ для гомогенной и на $\sim 62\%$ для композиционной преград. При низких V_0 скорость V_s выше для композиционной преграды, но при $V_0 \approx 1100$ м/с скорость потоков за обеими преградами получается одинаковой.

Для анализа эффективности защитных свойств исследуемых преград рассмотрим коэффициент эффективности защиты в виде $K_{ed} = \Delta V/V_0$, где $\Delta V = (V_0 - V_s)$ — потеря скорости ударника при пробитии преград.

Граничные значения K_{ed} определяются следующим образом: $K_{ed} = 1$ — максимальное значение, достигается при V_0 , равном пределу сквозного пробития преграды, и $K_{ed} \approx 0$ — минимальное значение, получается при значениях V_s , близких к V_0 (высокие скорости удара, тонкие и малопрочные преграды и т. п.).

Зависимость K_{ed} для исследуемых преград приведена на рис. 8. Штрихами показана экстраполяция кривых в область предполагаемых граничных значений K_{ed} . Характер кривых также свидетельствует о том, что при высоких скоростях $V_0 \geq 1100$ м/с композиционные преграды могут быть эффективнее гомогенных.

Заключение

Проведенные эксперименты позволили установить ряд особенностей процесса соударения, выявить характерные черты и получить конкретные оценки зон разрушения преград.

Отмечено, что сквозное разрушение стальной гомогенной преграды высокоплотным удлиненным ударником из сплава ВНЖ-90 происходит с образованием тыльного откола. В то же время при пробитии первого стального слоя композиционной преграды откол не образуется.

Средний керамический слой хрупко разрушается на многочисленные фрагменты, воздействующие совместно с ударником на тыльный стальной слой композиционной преграды. Такое воздействие приводит к разрыву тыльного слоя преграды на отдельные фрагменты.

С целью повышения защитных свойств композиционной преграды тыльный слой следует усиливать, предотвращая тем самым его катастрофическое разрушение.

Высокоскоростная киносъемка позволила провести анализ динамики процесса внедрения ударника и разрушения преграды. Сделаны оценки скорости запреградного потока для исследуемых преград.

Рассмотрение коэффициента эффективности защитных свойств преграды по относительной величине потери скорости при пробитии преград позволяет сделать вывод о более высоких защитных свойствах композиционных преград при скоростях встречи более 1100 м/с.

Результаты экспериментов могут быть использованы также для корректировки моделей сред и критериев их разрушения при численном моделировании процессов соударения.

Список литературы

- [1] Физика ударных волн, горения, детонации, взрыва и неравновесных процессов. Коллективная монография / Под ред. В.А. Левина, Н.А. Фомина, В.Е. Фортова. Ч. 1. Минск: Институт тепло-массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2014. С. 11–22.
- [2] Zakharov V.M. // AIP Conf. Proceedings. AIP Publishing, 2016. Vol. 1698. P. 040008-1–040008-6.
- [3] Белов Н.Н., Югов Н.Т., Афанасьева С.А., Табаченко А.Н., Коняев А.А., Толкачев В.Ф., Югов А.А. // ДАН. 2005. Т. 402. № 5. С. 617–622.