

## Особенности математического моделирования разрушения керамических пластин под воздействием высокоскоростных ударников

© А.В. Петюков, К.А. Грин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва

*Рассмотрены вопросы математического моделирования пробития керамических бронепанелей высокоскоростными цилиндрическими ударниками. С использованием программного комплекса LS-DYNA разработана соответствующая методика численного моделирования: выбран метод моделирования, подобраны размеры расчетных ячеек, значения числа Куранта, а также значения линейных и квадратичных коэффициентов псевдовязкости. Путем сравнения результатов расчета с экспериментальными данными показано, что лагранжевы и эйлеровы численные методы воспроизводят процесс расщепления ударной волны на упругий предвестник и пластическую волну. Определены также характерные размеры выбиваемой из керамической преграды конической пробки, и показано влияние масштабного эффекта на качественную картину разрушения керамики: с увеличением толщины преграды увеличивается угол полураствора выбиваемого из материала конуса.*

**Ключевые слова:** керамическая преграда, численные методы, модель Джонсона — Холмквиста, коническая трещина, карбид бора, SPH-метод, упругий предвестник, пластическая волна

**Введение.** В большинстве современных средств индивидуальной бронезащиты от автоматных и винтовочных пуль используется керамика. Это обусловлено ее физико-механическими характеристиками. С одной стороны, низкие значения плотности ( $\rho = 2,4 \dots 3,9 \text{ г/см}^3$ ) позволяют уменьшить массу бронезилета по сравнению со стальными бронепластинами, с другой стороны, высокие значения модуля упругости ( $E = 350 \dots 475 \text{ ГПа}$ ) и твердости керамики ( $10 \dots 30 \text{ ГПа}$ ) обеспечивают баллистическую стойкость против высокоэнергетических средств поражения [1–5]. В то же время остаются недостаточно изученными практически важные механизмы взаимодействия пуль стрелкового оружия с керамическими преградами [6, 7]. Как правило, для исследования баллистической стойкости материалов применяют экспериментальные методики [8–10]. При всех очевидных преимуществах таких способов они обладают существенным недостатком: высокой стоимостью и трудоемкостью. Следует отметить, что при большом числе варьируемых параметров не всегда удается установить их взаимосвязь с результатом испытаний (пробитием или непробитием преграды). Для снижения затрат на разработку новых изделий необходимо использовать возможности современного

компьютерного моделирования высокоскоростных динамических процессов.

Целью данной работы является разработка расчетной методики для оценки параметров разрушения высокопрочной керамики при ее пробитии цилиндрическими ударниками.

**Поиск и валидация метода моделирования.** В основу методики оценки закладывался программный комплекс LS-DYNA, а также несколько различных расчетных методов, интегрированных в него: SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics — метод сглаженных частиц), ALE-2D и лагранжев метод Уилкинса [11]. Все эти методы опираются на систему уравнений, которая описывает законы сохранения массы, импульса и энергии в дифференциальной форме и дополнена соотношениями для девиатора напряжений, замыкающими соотношениями (уравнениями состояния и моделями прочности), а также начальными и граничными условиями для каждой конкретной задачи.

Важнейший этап при разработке расчетной методики — тестирование на соответствие математической модели реальному физическому процессу. Для этого была проведена серия расчетов по численному моделированию экспериментов, описанных в работе [12]: ударники из различных материалов разгонялись ствольной установкой до скоростей  $v_{уд} = 300 \dots 4000$  м/с и соударялись с зафиксированным в пространстве образцом карбида бора  $B_4C$  (рис. 1). Скорость  $v$  тыльной поверхности образца определялась с помощью интерферометра VISAR через окно из фторида лития LiF или полиметилметакрилата (PMMA). За ударником также располагалась подложка, изготовленная из полиуретановой пены PU различной плотности в экспериментах № 1–8, из тантала Ta в эксперименте № 9 и из PMMA в эксперименте № 10. Дополнительная информация об экспериментах № 1–10 приведена в табл. 1.

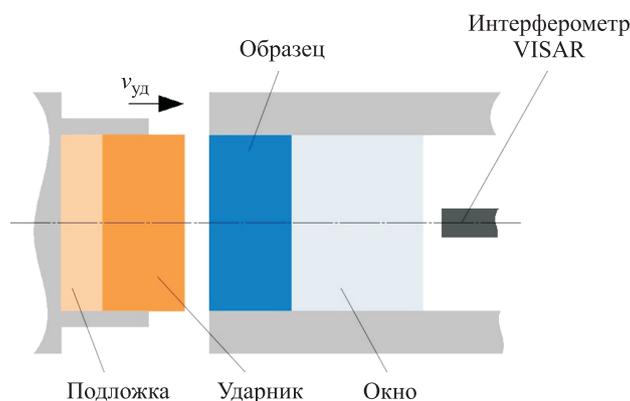


Рис. 1. Схема эксперимента

Дополнительная информация об экспериментах № 1–10

Номер эксперимента	Плотность материала подложки $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Материал		Скорость ударника $v_{уд}$ , м/с
		ударника	окна	
1	320	В <sub>4</sub> С	LiF	1546
2	640	В <sub>4</sub> С	LiF	2210
3	320	В <sub>4</sub> С	PMMA	370
4	320	В <sub>4</sub> С	LiF	1633
5	640	В <sub>4</sub> С	LiF	2076
6	160	PMMA	PMMA	913
7	640	Ta	LiF	2059
8	160	PMMA	PMMA	1162
9	16 660	LiF	LiF	2320
10	1186	В <sub>4</sub> С	LiF	3980

Расчеты проводились в осесимметричной двумерной постановке. Для обеспечения устойчивости численных расчетов число Куранта выбрано равным 0,2. Для сквозного расчета ударных волн (без их явного выделения на расчетной сетке) использовалась комбинированная псевдовязкость, характеризующаяся линейным  $q_1$  и квадратичным  $q_2$  коэффициентами [13].

Сжимаемость некерамических материалов моделировалась с помощью уравнения состояния (УРС) Ми — Грюнайзена в форме

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{3}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a \mu) E, \quad (1)$$

где  $\rho_0$ ,  $\rho$  — начальное и текущее значения плотности материала соответственно;  $C$  — угловой коэффициент кривой сжатия;  $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$  [11];

$\gamma_0$  — коэффициент Грюнайзена;  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $a$  — эмпирические параметры УРС.

Значения констант для УРС LiF и Ta были взяты из работ [14, 15], а для УРС стали У12А, PU и PMMA подбирались по экспериментальным данным [16–19].

Для сравнения на рис. 2 представлены ударные адиабаты, рассчитанные по уравнению (1) (сплошные линии), и экспериментальные данные о сжатии используемых материалов (точки). По графикам можно судить, что при использовании параметров, приведенных в табл. 2, уравнение (1) обеспечивает удовлетворительную аппроксимацию экспериментальных результатов.

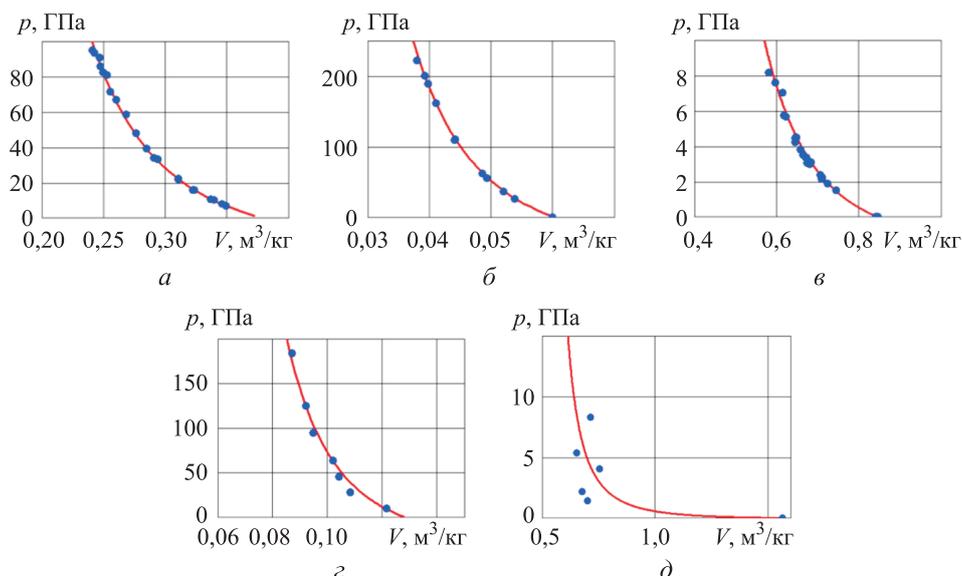


Рис. 2. Ударная адиабата для LiF (а), Та (б), РММА (в), стали У12А (г), для PU (д) при  $\rho = 640 \text{ кг/м}^3$  ( $V$  — удельный объем материала)

Таблица 2

Константы для моделей прочности и УРС некерамических материалов

Материал	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$G$ , ГПа	$\sigma_T$ , МПа	$C$ , м/с	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$a$	$\gamma_0$
LiF	2640	55,14	11,2	5150	1,35	0	0	0	1,69
Ta	16 600	68	700	3414	1,20	0	0	0	1,60
PMMA	1186	0,83	50	2701	1,45	0	0	0	0,90
У12А	7800	80	200	4369	1,49	0	0	0	2,17
PU	640	0,92	5	740	1,45	0	0	0	0,10

Примечание:  $G$  — модуль сдвига;  $\sigma_T$  — предел текучести.

Физико-механическое поведение В<sub>4</sub>С описывалось с помощью модели Джонсона — Холмквиста [20], константы к которой приведены ниже:

$\rho = 2506 \text{ кг/м}^3$	$A = 0,927$	HEL = 19 ГПа	$D_1 = 0,001$
$G = 197 \text{ ГПа}$	$B = 0,7$	$P_{\text{HEL}} = 8,71 \text{ ГПа}$	$D_2 = 0,5$
$E = 462 \text{ ГПа}$	$C = 0,005$	$K_1 = 233 \text{ ГПа}$	$\varepsilon = 1$
$T = 0,26 \text{ ГПа}$	$M = 0,85$	$K_2 = -593 \text{ ГПа}$	$\beta = 1$
$\sigma_{f\text{max}}^* = 0,2$	$N = 0,67$	$K_3 = 2800 \text{ ГПа}$	

Здесь  $E$  — модуль Юнга; подробное описание физического смысла остальных констант можно найти в работе [20].

Для выбора наилучшего метода решения были проведены расчеты опыта № 7 (см. табл. 1), в которых варьировали размер расчетной ячейки (от 0,01 до 0,50 мм) и значения линейного  $q_1$  и квадратичного  $q_2$  коэффициентов псевдовязкости (от 0,01 до 8,0). При этом из экспериментальной схемы (см. рис. 1) была убрана подложка из PU. Для того чтобы доказать корректность такого допущения, были проведены сравнительные расчеты для каждого рассматриваемого метода с подложкой и без нее; результаты сравнения приведены на рис. 3. Между полученными кривыми отсутствует критическое различие: это объясняется тем, что вследствие малого акустического импеданса PU ( $Z = 1,4 \cdot 10^6$  Па·с/м для плотности  $\rho = 640$  кг/м<sup>3</sup>) по сравнению с импедансом тантала ( $Z = 56 \cdot 10^6$  Па·с/м) ударная волна, возникшая от столкновения ударника с образцом, отражается от поверхности подложки волной разрежения, которая не оказывает значительного влияния на упругий предвестник и пластическую волну в образце [21]. При использовании подложек из еще менее плотного материала (PU плотностью 320 и 160 кг/м<sup>3</sup>) волновая картина будет аналогична описанной. Напротив, подложка из тантала ( $Z = 56 \cdot 10^6$  Па·с/м) в эксперименте № 9 оказывает значительное влияние вследствие генерирования отраженной от ударника из LiF ( $Z = 7,8 \cdot 10^6$  Па·с/м) ударной волны и повторного сжатия материала образца.

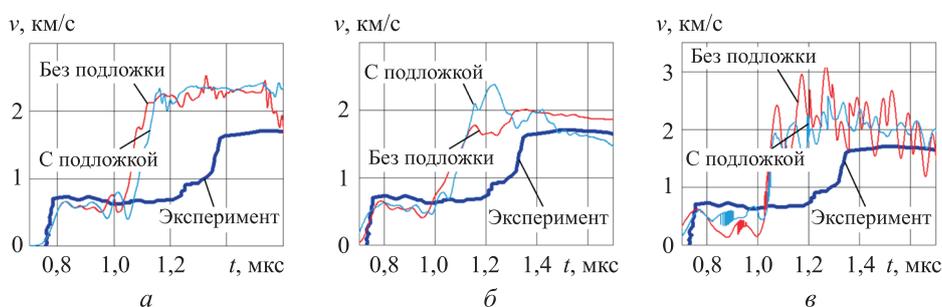


Рис. 3. Результаты расчетов с подложкой из PU и без подложки методами Уилкинса (а), ALE-2D (б) и SPH (в)

Результаты расчетов каждым из трех указанных методов приведены на рис. 4–6 в виде графиков зависимости скорости  $v$  тыльной поверхности образца от времени  $t$ . Все методы с довольно высокой точностью воспроизводят время прихода и амплитуду упругого предвестника, однако амплитуду пластической волны с удовлетворительной точностью воспроизводит только метод SPH (см. рис. 6). В расчетах лагранжевым методом Уилкинса и методом ALE-2D погрешность по величине пика пластической волны составляет около

25 и 40 % соответственно. При этом размер расчетной ячейки и значения коэффициентов псевдовязкости  $q_1$  и  $q_2$  не оказывают существенного влияния на результат (см. рис. 4, 5). К недостаткам лагранжева метода следует отнести также то, что из-за сильной деформации расчетной сетки необходимо использовать механизм удаления ячеек, который тем не менее не предотвращает преждевременную остановку расчета (рис. 4, а, кривая, соответствующая размеру ячейки 0,5 мм).

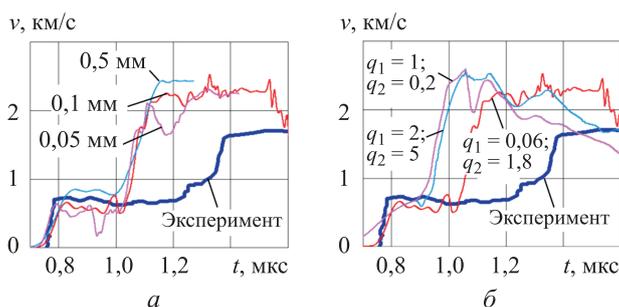


Рис. 4. Результаты расчетов методом Уилкинса для анализа влияния размера ячейки (а) и коэффициентов псевдовязкости  $q_1$  и  $q_2$  (б)

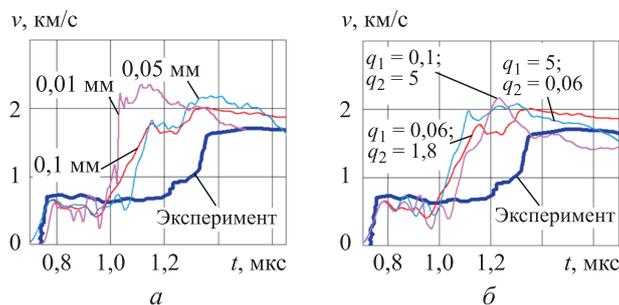


Рис. 5. Результаты расчетов методом ALE-2D для анализа влияния размера ячейки (а) и коэффициентов псевдовязкости  $q_1$  и  $q_2$  (б)

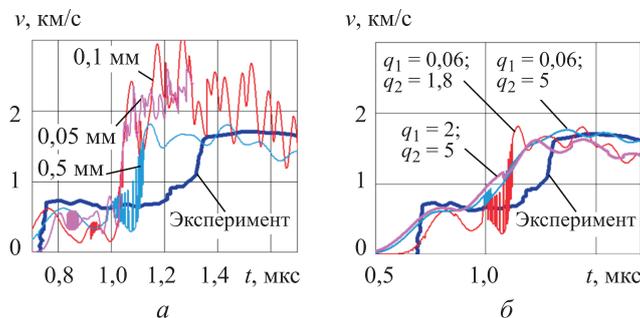
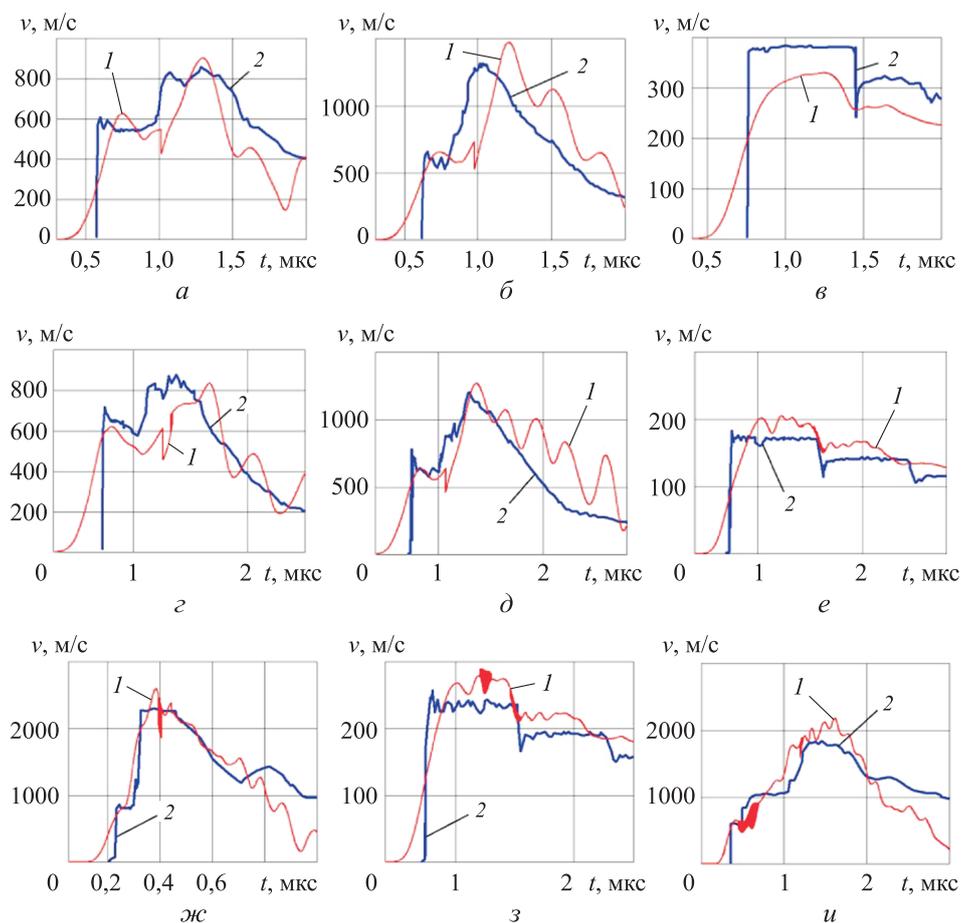


Рис. 6. Результаты расчетов методом SPH для анализа влияния размера ячейки (а) и коэффициентов псевдовязкости  $q_1$  и  $q_2$  (б)

Таким образом, можно сделать вывод, что метод SPH по сравнению с другими расчетными методами обеспечивает наилучшее согласование расчетных и экспериментальных данных. Все последующие расчеты были проведены с использованием этого метода.



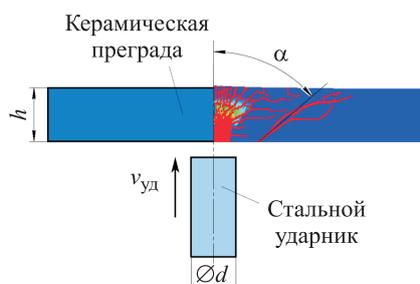
**Рис. 7.** Результаты моделирования соударений пластин в экспериментах:  
 а — № 1; б — № 2; в — № 3; г — № 4; д — № 5; е — № 6; ж — № 8; з — № 9; и — № 10;  
 1 — расчетные данные; 2 — экспериментальные данные

С помощью настроенной методики (размер расчетной ячейки 0,5 мм, линейный коэффициент псевдовязкости  $q_1 = 2$ , квадратичный коэффициент псевдовязкости  $q_2 = 5$ ) были проведены расчеты по условиям всех опытов, приведенных в табл. 1. По результатам, представленным на рис. 6, б и 7, видно, что расчетные зависимости довольно точно совпадают с экспериментальными: в опытах № 1, 2, 4, 5, 7, 9 и 10 отчетливо наблюдается расщепление ударной волны на упругий предвестник и пластическую волну, при этом амплитуды волн совпадают с зафиксированными в экспериментах; в опытах № 3,

6 и 8 (с отколом образца) расчетные данные также согласуются с экспериментальными данными — максимальное расхождение скорости откола, наблюдаемое в опыте № 3, не превышает 16 %, среднее — 8 %. Поскольку разработанная методика достаточно точно описывает все приведенные эксперименты в диапазоне скоростей ударника 300...4000 м/с, включая откольные, можно сделать вывод о ее верном подборе.

**Физика разрушения керамических преград.** Процесс взаимодействия ударников с керамикой можно разделить на две стадии: 1) начальную ударно-волновую; 2) динамического деформирования и проникания ударника в преграду. На ударно-волновой стадии по ударнику и преграде распространяются интенсивные ударные волны сжатия и разрежения. Вследствие высокой скорости звука в керамике (более 10 км/с) длительность этой стадии не превышает 0,5...1,0 мкс. Однако при схождении радиальных волн разгрузки на ось взаимодействия из-за невысокой прочности керамики на растяжение возможно ее разрушение непосредственно под ударником.

В силу того что твердость керамики значительно превосходит контактное давление, возникающее на второй стадии взаимодействия, в течение некоторого времени ударник срабатывается на преграде, как на жесткой стенке. Затем вследствие разрушения керамики резко уменьшается ее твердость и начинается проникание ударника. При разрушении выбивается коническая пробка, большая площадь основания которой находится с противоположной от ударника стороны [22] (рис. 8).



**Рис. 8.** Расчетная схема для определения размеров конической пробки с углом полураствора  $\alpha$

Для оценки размеров такой пробки были проведены расчеты процесса пробития керамической пластины из карбида бора цилиндрическим ударником из инструментальной углеродистой стали У12А. Механическое поведение керамики описывалось моделью Джонсона — Холмквиста, при этом отношение предела прочности на сжатие  $\sigma_{сж}$  к пределу прочности на растяжение  $\sigma_p$  равнялось 5. В расчетах

варьировали отношение толщины  $h$  пластины к диаметру  $d$  ударника в диапазоне 0,5...2,0.

**Результаты моделирования формирования конической пробоины.** Результаты моделирования приведены на рис. 9 в виде распределения поврежденности в керамике; красный цвет означает полностью разрушенный материал, синий — исходное состояние материала.

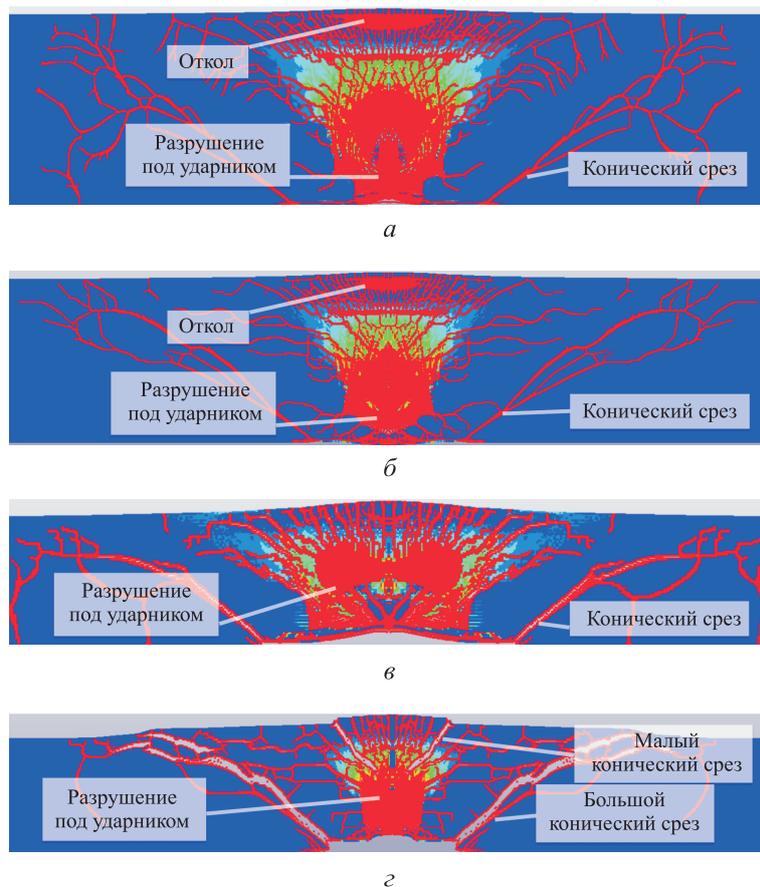


Рис. 9. Характер образования конуса при  $h/d = 1$  и  $h = 100$  мм (а), 50 (б), 25 (в) и 10 мм (г)

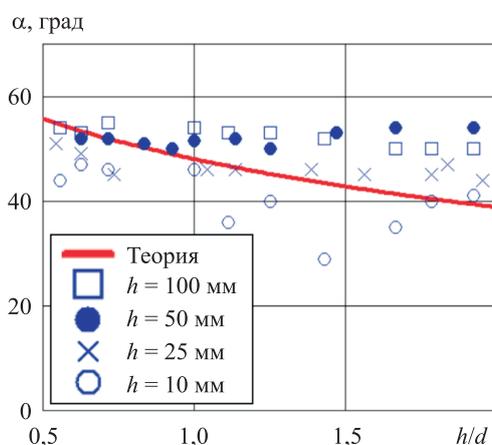
Исходя из полученных результатов можно отметить сложный характер разрушения керамики. На рис. 9, а (преграда толщиной  $h = 100$  мм) хорошо видно разрушенную область непосредственно под ударником, область откола с тыльной стороны преграды — следствие отраженной волны разрежения, направленной обратно к ударнику, срез конической пробки, а также ветвление магистральной конической трещины на более мелкие. Для преграды с  $h = 50$  мм (рис. 9, б) тенденции разрушения сохраняются, но происходит

уменьшение размеров тыльного откола и области разрушения под ударником. Для преграды с  $h = 25$  мм (рис. 9, в) отсутствует тыльный откол и увеличивается область разрушения под ударником, кроме того, заметно расширение конусной пробки по мере приближения к тыльной поверхности преграды. Для преграды с  $h = 10$  мм (рис. 9, г) можно наблюдать выбивание двух конусных пробок — большой и малой.

В первом приближении размеры выбиваемой пробки можно оценить по зависимости для угла полураствора конуса, приведенной в работе [23]:

$$\alpha = \arctg \left[ \frac{d}{2h} \left( - \left( 1 + 0,5 \frac{h}{d} \right) + \sqrt{\left( 1 + 0,5 \frac{h}{d} \right)^2 + 4 \frac{h}{d} \left( 0,58 \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p - 0,5} \right)} \right) \right]. \quad (2)$$

На рис. 10 представлены обобщенные результаты численных расчетов, а также приведена для сравнения зависимость (2). Видно, что расхождение между теоретической зависимостью (2) и численным решением не превышает 10 %. Прослеживается также явное влияние масштабного эффекта: с увеличением толщины преграды увеличивается и угол  $\alpha$  полураствора конуса.



**Рис. 10.** Зависимость угла  $\alpha$  полураствора конической пробки от отношения  $h/d$  при различной толщине керамической пластины

**Заключение.** В результате проведенных исследований разработана численная методика, позволяющая оценить параметры разрушения керамических пластин при их пробитии цилиндрическими ударниками. Методика подкреплена сравнением результатов расчетов с известными экспериментальными данными. Показано, что предлагаемая методика довольно точно воспроизводит амплитуды упругого предвестника и пластической волны, зафиксированные в экспериментах

(средняя погрешность не превышает 8 %). С помощью полученной методики были определены размеры выбиваемой конической пробки, а также выявлено влияние масштабного эффекта на качественную картину разрушения керамики при ее пробитии цилиндрическими ударниками.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Судник Л.В., Галиновский А.Л., Колпаков В.И., Муляр С.Г., Абашин М.И., Проваторов А.С. Модернизация технологии оценки эксплуатационных динамических свойств композиционной конструкционной керамики путем использования гидроабразивной ультраструи. *Наука и образование*, 2014, № 3, с. 15–23. URL: <http://engineering-science.ru/doc/701307.html> (дата обращения 01.11.2021). DOI: 10.7463/0314.0701307
- [2] Галиновский А.Л., Колпаков В.И., Муляр С.Г. Анализ эффективности различных средств индивидуальной бронезащиты. *Наука и образование*, 2012, № 3, с. 1–13. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/342101.html> (дата обращения 01.11.2021).
- [3] Кобылкин И.Ф., Горбатенко А.А. Аналитическая модель пробития керамико-металлических защитных преград и их оптимизация. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2018, № 2 (119), с. 17–30. DOI: 10.18698/0236-3941-2018-2-17-30
- [4] Слуцкер А.И., Синани А.Б., Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Орданьян С.С. Твердость микропористой SiC-керамики. *Журнал технической физики*, 2008, т. 78, вып. 12, с. 59–64.
- [5] Ульянов В.Л., Ботаки А.А., Поздеева Э.В. Упругие и акустические свойства керамических диэлектриков. *Известия Томского политехнического университета*, 2006, т. 309, № 2, с. 27–31.
- [6] Гриневиц А.В., Лавров А.В. Оценка баллистических характеристик керамических материалов. *Труды ВИАМ*, 2018, № 3 (63), с. 95–102. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-95-102
- [7] Анискович В.А., Ермоленко А.Ф., Кульков А.А. Комплексный научно-технологический подход к созданию легкой полимеркерамической брони. *Авиационные материалы и технологии*, 2018, № 4 (53), с. 45–54. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-45-54
- [8] Овсиенко А.И., Румянцев В.И., Беспалов И.А., Сильников Н.М. Перспективы применения реакционноспеченного карбида бора в качестве броневой керамики. *Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму*, 2015, № 7-8 (85-86), с. 95–101.
- [9] Беспалов И.А., Галиновский А.Л., Муляр С.Г. Сравнительный анализ двух экспресс-методик оценки баллистических свойств керамических материалов. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2011, № 4-3 (288), с. 139–144.
- [10] Беспалов И.А., Григорян В.А., Кобылкин И.Ф. Экспериментальное определение времени задержки проникания высокоскоростных ударников в керамическую броню. *Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму*, 2011, № 3-4, с. 84–88.
- [11] *LS-DYNA Theory Manual*. Livermore Software Technology Corporation (r:11261), 2019. URL: [https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/DRAFT\\_Theory.pdf](https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/DRAFT_Theory.pdf) (дата обращения 01.11.2021).
- [12] Grady D.E., Moody R.L. Shock compression profiles in ceramics. *Sandia National Laboratories Reports*, 1996, no. SAND96-0551, pp. 53–63.

- URL: [https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc666115/m2/1/high\\_res\\_d/211375.pdf](https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc666115/m2/1/high_res_d/211375.pdf) (дата обращения 01.11.2021).
- [13] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. *Прикладная механика сплошных сред. Т. 3: Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 521 с.
- [14] Steinberg D. *Equation of State and Strength Properties of Selected Materials*. Lawrence Livermore National Laboratory, 1991, pp. 1–11.
- [15] *Selected Hugoniot*s. Los Alamos Scientific Laboratory Report, 1969, LA-4167-MS.
- [16] Dattelbaum D.M., Coe J.D., Kiyanda Ch.B., Gustavsen R.L., Patterson B.M. Reactive, anomalous compression in shocked polyurethane foams. *J. of Applied Physics*, 2014, vol. 115, no. 17, pp. 174908–174908-12. DOI: 10.1063/1.4875478
- [17] Saint-Michel F., Chazeau L., Cavaillé J.-Y., Chabert E. Mechanical properties of high density polyurethane foams: I. Effect of the density. *Composites Science and Technology, Elsevier*, 2006, no. 66, pp. 2700–2708. DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.03.009
- [18] Patel P.S.D., Shepherd D.E.T., Hukins D.W.L. Compressive properties of commercially available polyurethane foams as mechanical models for osteoporotic human cancellous bone. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 2008, vol. 9, no. 137. DOI: 10.1186/1471-2474-9-137
- [19] Marsh S.P. (ed.) *Lasl Shock Hugoniot Data*. University of California Press, 1980, pp. 212–474.
- [20] Johnson G.R., Holmquist T.J. Response of boron carbide subjected to large strains, high strain rates, and high pressures. *J. of Applied Physics*, 1999, vol. 85, no. 12, pp. 8060–8073. DOI: 10.1063/1.370643
- [21] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва. Т. 1*. 3-е изд., Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2004, 831 с.
- [22] Григорян В.А., Кобылкин И.Ф., Маринин В.М., Чистяков Е.Н. *Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования*. Москва, РадиоСофт, 2008, 406 с.
- [23] Кобылкин И.Ф. Механика пробивания керамических преград. *Физика горения и взрыва*, 2017, т. 53, № 1, с. 123–128. DOI: 10.15372/FGV20170115

Статья поступила в редакцию 28.10.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Петюков А.В., Грин К.А. Особенности математического моделирования разрушения керамических пластин под воздействием высокоскоростных ударников. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 12.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-12-2133>

**Петюков Андрей Вячеславович** — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области численного моделирования взрывных и высокоскоростных ударных процессов. e-mail: [petyukov\\_a@bmstu.ru](mailto:petyukov_a@bmstu.ru)

**Грин Катерина Артемовна** — студентка кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [katerine.grin@gmail.com](mailto:katerine.grin@gmail.com)

## Specific features of mathematical modeling of ceramic plates destruction under the influence of high-speed impactors

© A.V. Petyukov, K.A. Grin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The paper examines the issues of mathematical modeling of ceramic armor panels' penetration by high-speed cylindrical impactors. By means of the LS-DYNA software package, a corresponding numerical simulation methodology was developed by combining a chosen method, adjusted computational mesh cells size, appropriate Courant number, and values of linear and quadratic pseudo-viscosity coefficients. The results compared with experimental data show that Lagrangian and Eulerian numerical methods, unlike the SPH method (Smoothed Particle Hydrodynamics), improperly reproduce the process of the shock wave disintegration into an elastic precursor and a plastic wave. In addition, the common size of conical fractions dislodging from the ceramic plates was determined and the influence of the scale effect on the ceramics damage patterns was shown: an increase in the absolute value of the plate thickness leads to the increase in the dislodging cone semi-vertex angle.*

**Keywords:** ceramic plate, numerical methods, Johnson — Holmquist damage model, cone fracture, boron carbide, SPH, elastic precursor, plastic wave

### REFERENCES

- [1] Sudnik L.V., Galinovskiy A.L., Kolpakov V.I., Mulyar S.G., Abashin M.I., Provatorov A.S. *Nauka i obrazovanie (Science and education)*, 2014, no. 3, pp. 15–23. DOI: 10.7463/0314.0701307
- [2] Galinovskiy A.L., Kolpakov V.I., Mulyar S.G. *Nauka i obrazovanie (Science and education)*, 2012, no. 3, pp. 1–13. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/342101.html> (accessed November 11, 2021).
- [3] Kobylkin I.F., Gorbatenko A.A. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana, Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2018, no. 2 (119), pp. 17–30. DOI: 10.18698/0236-3941-2018-2-17-30
- [4] Slutsker A.I., Sinani A.B., Betekhtin V.I., Kadomtsev A.G., Ordanyan S.S. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics*, 2008, vol. 78 (12), pp. 59–64.
- [5] Ulyanov V.L., Botaki A.A., Pozdeeva E.V. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 2, pp. 27–31.
- [6] Grinevich A.V., Lavrov A.V. *Trudy VIAM — Proceedings of VIAM*, 2018, no. 3 (63), pp. 95–102. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-95-102
- [7] Aniskovich V.A., Ermolenko A.F., Kulkov A.A. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technologies*, 2018, no. 4 (53), pp. 45–54. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-45-54
- [8] Ovsienko A.I., Rumyantsev V.I., Bespalov I.A., Silnikov N.M. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu — Military Engineering. Issue 16, Counter-terrorism technical devices*. 2015, no. 7–8 (85–86), pp. 95–101.
- [9] Bespalov I.A., Galinovskiy A.L., Mulyar S.G. *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii — Fundamental and Applied Problems of Technics and technology*, 2011, no. 4–3 (288), pp. 139–144.

- [10] Bespalov I.A., Grigoryan V.A., Kobylkin I.F. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu — Military Engineering. Issue 16, Counter-terrorism technical devices*. 2011, no. 3–4, pp. 84–88.
- [11] *LS-DYNA Theory Manual*. Livermore Software Technology Corporation, r:11261, 2019. Available at: [https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/DRAFT\\_Theory.pdf](https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/DRAFT_Theory.pdf) (accessed November 1, 2021).
- [12] Grady D.E., Moody R.L. Shock compression profiles in ceramics. *Sandia National Laboratories Reports*, 1996, no. SAND96-0551, pp. 53–63. Available at: [https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc666115/m2/1/high\\_res\\_d/211375.pdf](https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc666115/m2/1/high_res_d/211375.pdf) (accessed November 1, 2021).
- [13] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. *Prikladnaya mekhanika sploshnykh sred. T. 3 Chislennyye metody v zadachakh fiziki bystroprotokayuschikh protsessov* [Applied Continuum Mechanics. Vol. 3 Numerical methods in problems of physics of fast processes]. Moscow, BMSTU Publ., 2006, 521 p.
- [14] Steinberg D. *Equation of State and Strength Properties of Selected Materials*. Lawrence Livermore National Laboratory, 1991, pp. 1–11.
- [15] *Selected Hugoniot*s. Los Alamos Scientific Laboratory, no. LA-4167-MS, 1969.
- [16] Dattelbaum D.M., Coe J.D., Kiyanda Ch.B., Gustavsen R.L., Patterson B.M. Reactive, anomalous compression in shocked polyurethane foams. *Journal of Applied Physics*, 2014, vol. 115 (17), pp. 1749098–174908-12. DOI: 10.1063/1.4875478
- [17] Saint-Michel F., Chazeau L., Cavaillé J.-Y., Chabert E. Mechanical properties of high density polyurethane foams: I. Effect of the density. *Composites Science and Technology*, 2006, no. 66, pp. 2700–2708. DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.03.009
- [18] Patel P.S.D., Shepherd D.E.T., Hukins D.W.L. Compressive properties of commercially available polyurethane foams as mechanical models for osteoporotic human cancellous bone. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 2006, vol. 9 (137). DOI: 10.1186/1471-2474-9-137
- [19] Marsh S.P., ed. *Lasl Shock Hugoniot Data*. University of California Press, 1980, pp. 212–474.
- [20] Johnson G.R., Holmquist T.J. Response of boron carbide subjected to large strains, high strain rates, and high pressures. *Journal of Applied Physics*, 1999, vol. 85 (12), pp. 8060–8073. DOI: 10.1063/1.370643
- [21] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva* [Explosion physics]. Vol. 1. Moscow, FIZMATLIT, 2004, 831 p.
- [22] Grigoryan V.A., Kobylkin I.F., Marinin V.M., Chistyakov E.N. *Materialy i zaschitnye struktury dlya lokalnogo i individualnogo bronirovaniya* [Materials and protective structures for local and individual booking]. Moscow, RadioSoft Publ., 2008, 406 p.
- [23] Kobylkin I.F. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2017, vol. 53, no. 1, pp. 123–128. DOI: 10.15372/FGV20170115

**Petyukov A.V.** (b. 1990), graduated from Bauman Moscow State Technical University in 2013, Cand. Sc. (Eng.), Assist. Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, BMSTU; Author of over 20 research papers in the field of numerical simulations of explosive and high-speed shock processes. e-mail: [petyukov\\_a@bmstu.ru](mailto:petyukov_a@bmstu.ru)

**Grin K.A.** (b. 1999), student, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: [katerine.grin@gmail.com](mailto:katerine.grin@gmail.com)