

УДК 531.58

СТОЙКОСТЬ КЕРАМИК К УДАРУ В ЧИСЛЕННОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

А. Е. Краус, Е. И. Краус, И. И. Шабалин

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
E-mails: akraus@itam.nsc.ru, kraus@itam.nsc.ru, shabalin@itam.nsc.ru

Для верификации параметров баллистической стойкости пластин из керамик Al_2O_3 , B_4C и SiC выполнена серия расчетов на основе экспериментальных данных о глубине проникания ударников в пластины. Проведено моделирование взаимодействия ударника из стали в виде сердечника с мишенью из алюминиевого сплава, перед которой закреплена керамическая пластина переменной толщины. Проведено сравнение результатов расчета и экспериментальных данных для различных керамических преград толщиной $1 \div 5$ мм при скорости взаимодействия с ударником $810 \div 850$ м/с.

Ключевые слова: метод depth-of-penetration, сердечник, глубина проникания, керамическая преграда, ударное взаимодействие, параметры разрушения.

DOI: 10.15372/PMTF20200520

Введение. Керамика используется в системах брони в течение более 50 лет, поскольку это позволяет повысить прочность слоеных или неоднородных бронепластин [1].

Для оценки эффективности керамических бронепреград был предложен метод DOP (depth-of-penetration) [2, 3], основанный на сравнении результатов метания ударника в монолитную преграду и керамическую защитную плиту, помещенную на массивный металлический блок. По отношению глубины проникания ударника в слоистую керамическую преграду к глубине его проникания в монолитную преграду можно судить об эффективности защиты брони (рис. 1). На рис. 1 L_0 — глубина каверны в монолитной преграде без керамической пластины, L_c — толщина керамической пластины, L_r — глубина каверны в преграде при наличии керамической пластины.

Несмотря на то что метод DOP был предложен более 30 лет назад и до сих пор активно используется при исследовании реакции броневых керамик на воздействие ударного нагружения пулями и стержнями, имеются сомнения в достоверности экспериментальных данных, получаемых с использованием этого метода [4]. Метод DOP имеет как преимущества, так и недостатки [5]. Преимущество метода заключается в том, что он позволяет достаточно просто оценивать эффективность защиты в виде керамических пластин. Глубина проникания, как правило, может быть измерена точно, поэтому представляет собой основную характеристику, получаемую в эксперименте. Недостатком метода является то, что с его помощью нельзя оценить прочность брони в целом, можно оценивать только

Работа выполнена частично в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. (код проекта АААА-А17-117030610136-3) и при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 19-08-00906).

© Краус А. Е., Краус Е. И., Шабалин И. И., 2020

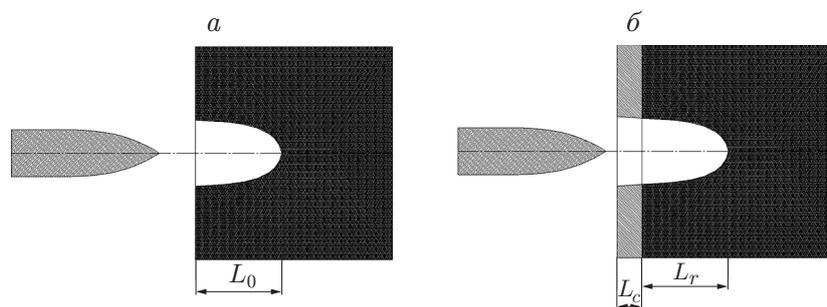


Рис. 1. Схемы ударника и преграды в отсутствие (а) и при наличии (б) керамической пластины

характеристики керамических пластин. Анализ данных, полученных в результате применения метода DOP, позволяет однозначно определить эффективность керамических броневых материалов, например их массовую эффективность. Результаты анализа показывают, что в некоторых случаях параметры испытаний, такие как отношение длины ударника к толщине керамической плитки, оказывают более существенное влияние на результаты испытаний, чем различие типов керамики. Таким образом, при проведении экспериментов методом DOP необходимо правильно определять и интерпретировать полученные оценки баллистических характеристик керамики.

Экспериментально показано, что баллистическая эффективность керамики определяется как типом головной части снаряда, относительным удлинением ударника, так и свойствами материала массивной подложки. Результаты испытаний методом DOP позволили выделить два свойства керамики: способность разрушать головную часть снаряда и способность тормозить снаряд путем его эрозии. В частности, из результатов работы [6], полученных на основе экспериментальных данных [7], следует, что баллистическая эффективность керамики существенно зависит от условий испытания.

На основе закона сохранения энергии и результатов испытаний методом DOP в работе [8] рассчитана прочность ряда хрупких материалов. Снаряд с сердечником из карбида вольфрама с заданной кинетической энергией проникал через пластину из хрупкого материала и останавливался в массивном блоке из алюминиевого сплава. Показано, что энергия, передаваемая плитке снарядом, линейно зависит от ее толщины. С использованием величины энергии, передаваемой керамической плитке, рассчитана средняя сила сопротивления, которая коррелирует с твердостью материала. В [8] также показано, что, в случае если в экспериментах, проведенных с использованием метода DOP, снаряд остается неповрежденным, средняя сила сопротивления характеризует твердость керамики, а не баллистическую стойкость брони. Исследована возможность использования метода DOP для измерения прочности поврежденной керамики.

Путем численного моделирования удара с использованием пакета ANSYS/AUTODYN выполнено сравнение баллистической стойкости двухслойной брони на основе керамики и алюминиевого сплава [9]. Расчеты проводились для карбида кремния и двуокси алюминия. Результаты расчетов показали, что баллистические характеристики брони на основе SiC–Al лучше баллистических характеристик брони на основе Al₂O₃–Al.

Результаты сравнения глубин проникания, полученных в эксперименте методом DOP и в расчете, позволяют определить параметры материалов в условиях динамического нагружения. В данной работе моделирование разрушения керамических материалов проводилось с использованием программного комплекса REACTOR, созданного в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН [10, 11].

Постановка задачи. Следуя работам [12, 13], будем использовать модель твердого деформируемого тела, включающую следующие уравнения:

— уравнение, определяющее компоненты вектора скорости:

$$\dot{x}_i = u_i;$$

— закон сохранения массы

$$V_0 \rho_0 = V \rho;$$

— закон изменения импульса материальной частицы

$$\rho \dot{u}_i = \sigma_{ij,j};$$

— закон изменения внутренней энергии частицы

$$\rho \dot{e} = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij};$$

— соотношение между компонентами тензора скоростей деформаций и компонентами вектора скорости

$$\dot{\epsilon}_{ij} = 0,5(u_{i,j} + u_{j,i});$$

— соотношение для компонент тензора напряжений

$$\sigma_{ij} = -P \delta_{ij} + s_{ij},$$

где s_{ij} — компоненты девиатора тензора напряжений; δ_{ij} — символ Кронекера; P — функция давления в форме функции Ми — Грюнайзена.

Определяющие уравнения принимаем в форме уравнений Прандтля — Рейсса

$$\hat{s}_{ij} + d\lambda' s_{ij} = 2G \dot{\epsilon}'_{ij}, \quad \dot{\epsilon}'_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon}_{kk}/3$$

с условием пластичности Губера — Мизеса

$$s_{ij} s_{ij} \leq 2Y_0^2/3.$$

Здесь Y_0 — динамический предел текучести; для определения скалярного множителя $d\lambda'$ используется известная процедура приведения к кругу текучести. В приведенных выше уравнениях каждый из индексов i, j пробегает значения 1, 2, 3; по повторяющимся индексам проводится суммирование; точка над символом обозначает производную по времени, индекс после запятой — производную по соответствующей координате; x_i, u_i — компоненты векторов положения и скорости материальной частицы соответственно; ρ — текущая плотность; G — модуль сдвига.

Уравнения в частных производных преобразуются в явную разностную схему на треугольной сетке вдоль траектории каждой материальной частицы (в данном случае — ячейки разностной сетки). Разностная сетка в произвольных многосвязных областях строится с использованием динамического метода [14, 15].

Для учета процессов разрушения система дополняется соотношениями, связывающими параметры напряженно-деформированного состояния с предельными величинами материалов [13, 16]. В качестве уравнения состояния используется термодинамически полное малопараметрическое уравнение состояния [17–19], все параметры которого приведены в справочниках. Расчет параметров поверхностей контакта взаимодействующих деформируемых твердых тел осуществляется по симметричному алгоритму [20]. Сформулированные выше модели реализованы в виде комплекса программ REACTOR, позволяющего решать плоские и аксиально-симметричные задачи механики деформируемого твердого тела в широком диапазоне скоростей соударения [21–23].

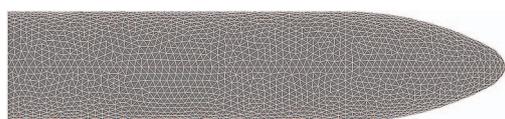


Рис. 2

Рис. 2. Трехмерная модель ударника

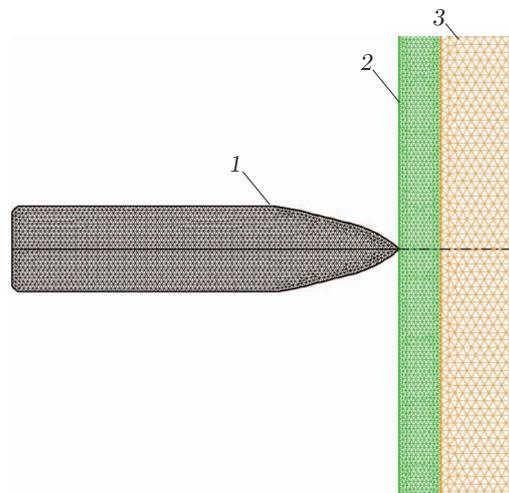


Рис. 3

Рис. 3. Схема ударника и преграды в двумерной постановке:

1 — стальной ударник, 2 — пластина (Al_2O_3), 3 — преграда (сплав Al 5083)

При моделировании соударения ударника и мишени в экспериментах, проводимых с помощью метода DOP, использовались начальные данные (геометрия ударника и преграды, диапазон скоростей соударения, материалы, подвергнутые испытаниям), приведенные в работе [24]. Ударник, геометрическая модель которого показана на рис. 2, представляет собой сердечник из стали твердостью HRC = 63, имеющий длину 35,31 мм, диаметр 7,83 мм и массу 10,81 г. Преграда — монолитная пластина из алюминиевого сплава Al 5083. При проведении испытания на стойкость керамик Al_2O_3 , B_4C и SiC к ударным нагрузкам тонкие пластины заданной толщины наклеивались на лицевую поверхность монолитной преграды (рис. 3).

Построение калибровочной кривой в случае монолитной преграды из алюминиевого сплава Al 5083. Для оценки стойкости керамики к ударным нагрузкам необходимо определить результаты воздействия ударных нагрузок на незащищенный массивный блок. В качестве материала массивного блока выбран алюминиевый сплав Al 5083. В результате серии расчетов, выполненных в диапазоне скоростей соударения $U = 300 \div 900$ м/с, определены параметры разрушения для сплава Al 5083, которые удовлетворяют экспериментальной зависимости глубины каверны от скорости удара [24] (рис. 4)

$$L_0 = 7,4959 - 8,361 \cdot 10^{-3}U + 6,4995 \cdot 10^{-5}U^2.$$

Здесь $U = 300 \div 900$ м/с — скорость ударника; L_0 — глубина каверны в алюминиевой преграде, мм.

Различие результатов численного решения и данных эксперимента составляет приблизительно 14 % при $U = 400 \div 600$ м/с и приблизительно 4 % при $U = 750 \div 850$ м/с, что удовлетворяет условиям задачи, поскольку эксперименты с керамическими пластинами проводились в диапазоне скоростей соударения $U = 820 \div 850$ м/с.

Моделирование соударения в экспериментах, проводимых с использованием метода DOP, для керамик Al_2O_3 , B_4C и SiC. Баллистическая эффективность керамик η определялась по формуле [7]

$$\eta = \frac{\rho_m(L_0 - L_r)}{\rho_c L_c}, \quad (1)$$

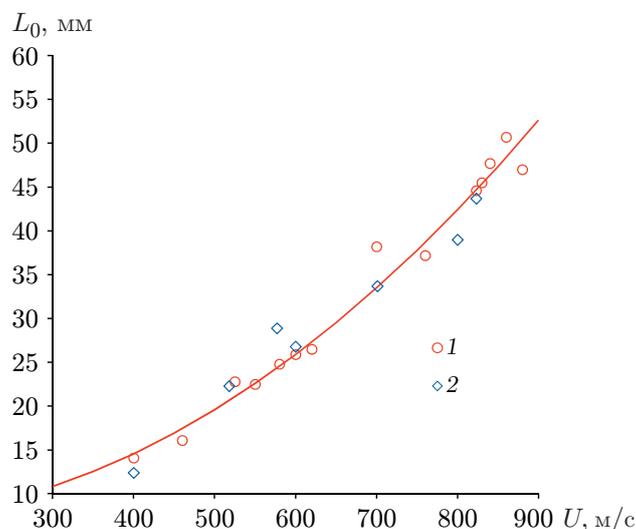


Рис. 4. Зависимость глубины проникания ударника от скорости соударения для алюминиевого сплава Al 5083:

1 — экспериментальные данные, 2 — результаты расчета, линия — калибровочная кривая

Таблица 1

Параметры разрушения материалов

Материал	Y , ГПа	σ_1 , ГПа	ε_1	ε_2
Al 5083	0,85	0,95	0,12	0,33
Al_2O_3	2,90	2,60	0,07	0,15
B_4C	9,82	8,10	0,10	0,27
SiC	8,20	7,25	0,15	0,29

где ρ_m — плотность блока из алюминиевого сплава; ρ_c — плотность керамики; L_0 , L_c , L_r — глубина каверны в блоке без керамической пластины, толщина керамической пластины и глубина каверны в блоке, защищенном керамической пластиной, соответственно.

С использованием экспериментальных данных работы [24] выполнена серия расчетов параметров ударного нагружения монолитного блока из алюминиевого сплава Al 5083, защищенного керамической пластиной. В табл. 1 приведены параметры разрушения для алюминиевого сплава Al 5083 и керамик (Y — предел текучести, σ_1 — напряжение откольного разрушения, ε_1 — предельная деформация при растяжении, ε_2 — предельная деформация при сжатии).

В расчетах варьировались вид керамики, толщина пластины, скорость соударения $U = 820 \div 840$ м/с. Результаты данной серии расчетов приведены на рис. 5 в координатах (L_c , L_r). Следует отметить, что кривые, аппроксимирующие расчетные данные, находятся в интервале разброса экспериментальных данных. Аппроксимация проводилась методом наименьших квадратов с использованием полинома второй степени. Различие расчетных и экспериментальных данных для керамики Al_2O_3 составляет приблизительно 6 %, для керамики B_4C — приблизительно 8 %, для керамики SiC — приблизительно 12 %.

Сравнение результатов двумерного и трехмерного моделирования. Для проверки исходных характеристик материалов, полученных в двумерных расчетах, проведены аналогичные расчеты в трехмерной постановке. Схема ударника и преграды в трехмерной постановке показана на рис. 6. Поскольку для решения трехмерной задачи требуется

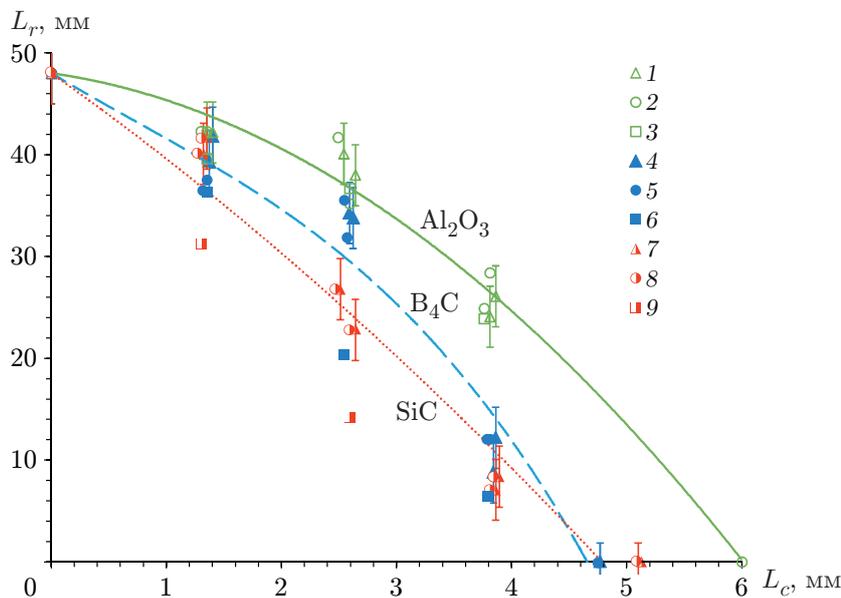


Рис. 5

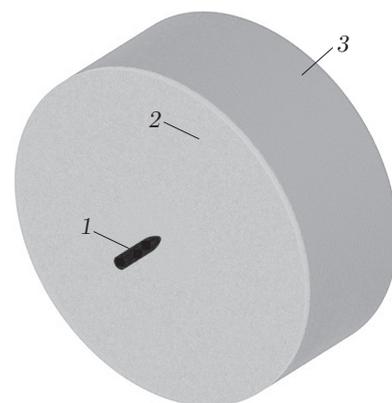


Рис. 6

Рис. 5. Зависимость глубины каверны в монолитной преграде при наличии керамической пластины от толщины керамической пластины:

1–3 — Al_2O_3 , 4–6 — B_4C , 7–9 — SiC ; 1, 4, 7 — экспериментальные данные, 2, 5, 8 — результаты двумерного расчета, 3, 6, 9 — результаты трехмерного расчета; линии — аппроксимирующие кривые

Рис. 6. Схема ударника и преграды в трехмерной постановке:

1 — стальной ударник, 2 — пластина (Al_2O_3), 3 — преграда (сплав Al 5083)

большее время, чем для решения двумерной аксиальной задачи, в трехмерной постановке были выполнены только некоторые необходимые расчеты. Полученные результаты представлены на рис. 5 и в табл. 2.

Если результаты двумерных и трехмерных расчетов глубины каверны достаточно хорошо согласуются, то значения остаточной массы ударника после разрушения могут различаться практически в два раза (рис. 7). Эти различия обуславливают необходимость уточнения моделей разрушения материалов в условиях динамического нагружения, когда наблюдается большая скорость эрозии проникающего тела.

По экспериментальным данным с использованием формулы (1) построена зависимость $\eta(L_c)$ (рис. 8). Аппроксимация проводилась методом наименьших квадратов с использованием полинома второй степени. На рис. 8 видно, что при заданной скорости испытаний баллистическая эффективность зависит от толщины керамической пластины. Заметим, что при малой толщине (менее 3 см) керамика SiC более эффективна, чем керамика B_4C . При больших толщинах защитной керамической плитки более эффективной является керамика B_4C . Керамика Al_2O_3 менее эффективна во всем диапазоне толщин.

Выводы. Из проведенной серии расчетов следует, что исследованные в работе параметры разрушения материалов позволяют описать динамические процессы с погрешностью менее 15 %. Этот вывод подтверждают результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных.

Результаты двумерных и трехмерных расчетов глубины каверны достаточно хорошо согласуются между собой и с экспериментальными данными.

Таблица 2

Результаты решения двумерной и трехмерной задач при различной толщине пластины L_c

Материал	L_c , мм	U , м/с	L_r , мм	
			Двумерная задача	Трехмерная задача
Al ₂ O ₃	1,35	841	38,5	39,6
	2,59	839	35,2	36,7
	3,76	837	24,9	23,9
B ₄ C	1,35	842	37,5	36,4
	2,54	848	32,2	20,4
	3,79	841	12,1	6,5
SiC	1,30	835	35,7	31,2
	2,59	839	24,3	14,2

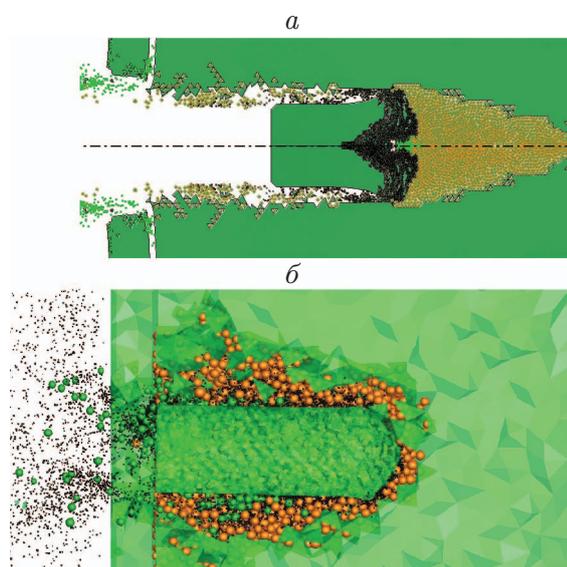


Рис. 7

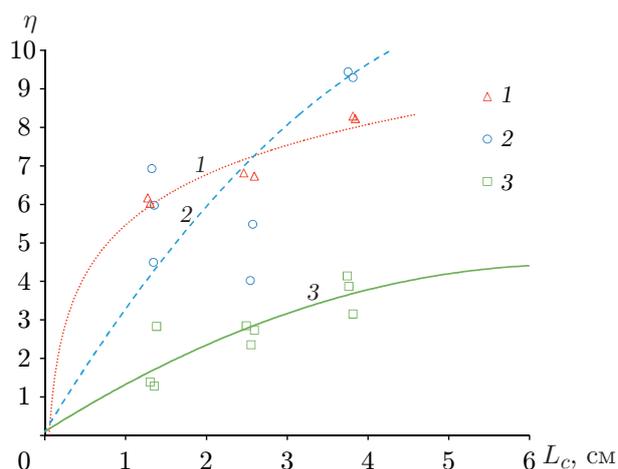


Рис. 8

Рис. 7. Результаты решения двумерной (а) и трехмерной (б) задач для керамики Al₂O₃ (скорость ударника 837 м/с, толщина керамической плитки 3,57 мм)

Рис. 8. Зависимость баллистической эффективности керамической пластины от ее толщины:

1 — SiC, 2 — B₄C, 3 — Al₂O₃; линии — аппроксимирующие кривые

Обработка результатов серии расчетов проникания ударников в массивные преграды, защищенные керамическими пластинами, показала, что при заданной скорости соударения $U = 835$ м/с эффективность керамики зависит от ее толщины. При малой толщине защитной керамической пластины наиболее эффективной является керамика SiC, при большой толщине — керамика B₄C. Керамика Al₂O₃ наименее эффективна во всем диапазоне толщин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kobytkin I. F. Materials and structures of light armor protection / I. F. Kobytkin, V. V. Selivanov. M.: Bauman Moscow State Tech. Univ., 2014.

2. **Rosenberg Z., Bless S., Yeshurun Y., Okajima K.** A new definition of ballistic efficiency of brittle materials based on the use of thick backing plates // Proc. of IMPACT 87 symp. "Impact loading and dynamic behavior of materials". Oberursel: DCM Informationsgesellschaft Verlag, 1988. P. 491–498.
3. **Rozenberg Z., Yeshurun Y.** The relation between ballistic efficiency and compressive strength of ceramic tiles // Intern. J. Impact Engng. 1988. V. 7, N 3. P. 357–362.
4. **Cui F., Wu G., Ma T., et al.** Effect of ceramic properties and depth-of-penetration test parameters on the ballistic performance of armour ceramics // Defence Sci. J. 2017. V. 67, N 3. P. 260–268.
5. **Franzen R. R., Orphal D. L., Anderson C. E.** The influence of experimental design on depth-of-penetration (DOP) test results and derived ballistic efficiencies // Intern. J. Impact Engng. 1997. V. 19, N 8. P. 727–737.
6. **Woodward R. L., Baxter B. J.** Ballistic evaluation of ceramics: Influence of test conditions // Intern. J. Impact Engng. 1994. V. 15, N 2. P. 119–124.
7. **Rosenberg Z.** Terminal ballistics / Z. Rosenberg, E. Dekel. Cham: Springer Intern. Publ., 2020.
8. **Hazell P. J.** Measuring the strength of brittle materials by depth-of-penetration testing // Adv. Appl. Ceramics. 2010. V. 109, N 8. P. 504–510.
9. **Venkatesan J., Iqbal M. A., Madhu V.** Ballistic performance of bilayer alumina/aluminium and silicon carbide/aluminium armours // Procedia Engng. 2017. V. 173. P. 671–678.
10. **Kraus E. I., Shabalin I. I.** Reactor 2D: A tool for simulation of shock deformation // AIP Conf. Proc. 2016. V. 1770. 030092.
11. **Kraus E. I., Shabalin I. I.** The tool for high-velocity interaction and damage of solids // Math. Montisnigri. 2017. V. 39. P. 18–29.
12. **Wilkins M. L.** Computer simulation of dynamic phenomena. Berlin: Springer, 1999.
13. **Фомин В. М.** Высокоскоростное взаимодействие тел / В. М. Фомин, А. И. Гулидов, Г. А. Сапожников и др. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1990.
14. **Краус Е. И., Фомин В. М., Шабалин И. И.** Динамический метод построения треугольных сеток в многосвязных областях // Вычисл. технологии. 2009. Т. 14, № 5. С. 40–48.
15. **Kraus E. I., Shabalin I. I., Shabalin T. I.** Automatic tetrahedral mesh generation for impact computations // AIP Conf. Proc. 2017. N 1893. 030129.
16. **Kraus E. I., Shabalin I. I., Shabalin T. I.** Numerical simulation of deformation and failure processes of a complex technical object under impact loading // J. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 991. 012048.
17. **Краус Е. И., Фомин В. М., Шабалин И. И.** Модельные уравнения термодинамических функций состояния веществ. 1. Твердое тело // Физ. мезомеханика. 2004. Т. 7. С. 285–288.
18. **Kraus E. I., Shabalin I. I.** A few-parameter equation of state of the condensed matter // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 774. 012009.
19. **Kraus E., Shabalin I.** Melting behind the front of the shock wave // Therm. Sci. 2019. V. 23, N 2. P. 519–524.
20. **Гулидов А. И., Шабалин И. И.** Численная локализация граничных условий в динамически контактных задачах. Новосибирск, 1987. (Препр. / Ин-т теорет. и прикл. механики СО АН СССР; 12).
21. **Краус Е. И., Мельников А. Ю., Фомин В. М., Шабалин И. И.** Пробитие ледяных преград конечной толщины стальными ударниками // ПМТФ. 2019. Т. 60, № 3. С. 146–153.
22. **Федоров М. Ю., Краус Е. И., Шабалин И. И.** Моделирование ударных воздействий на конструкцию в проблеме обеспечения безопасности космических ЯЭУ // Вестн. Моск. авиац. ин-та. 2009. Т. 16, № 3. С. 49–53.

23. **Kraus E. I., Shabalin I. I.** Simulation of fracture in 3D dynamic problems of collision of solid bodies // AIP Conf. Proc. 2018. V. 2027. 030165.
24. **Moynihan T. J., Chou S. C., Mihalcin A. L.** Application of the depth-of-penetration test methodology to characterize ceramics for personnel protection // Defence Technol. 2000. V. 15, N 6. P. 829–836.

*Поступила в редакцию 5/VI 2020 г.,
после доработки — 5/VI 2020 г.
Принята к публикации 29/VI 2020 г.*
