

УДК 531.66, 538.89

ПРОБИТИЕ ЛЕДЯНЫХ ПРЕГРАД КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ СТАЛЬНЫМИ УДАРНИКАМИ

Е. И. Краус*, А. Ю. Мельников*, В. М. Фомин*,**, И. И. Шабалин*

* Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия

** Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия

E-mails: Kraus@itam.nsc.ru, akcil@mail.ru, Fomin@itam.nsc.ru, Shabalin@itam.nsc.ru

Разработана и изготовлена одноступенчатая газовая установка, позволяющая ускорять тела массой 0,5 кг до скоростей порядка 1200 м/с. Проведены эксперименты по метанию стальных ударников в массивную ледяную мишень. Выполнено сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов, полученными с использованием комплекса программ Reactor, а также результатов численного расчета процесса разрушения ледяной преграды конечной толщины при ударе одиночного ударника и нескольких ударников. Показано, что удар стальным кольцом по ледяной преграде конечной толщины приводит к выбиванию максимального объема льда и к практически полной потере кинетической энергии кольца.

Ключевые слова: лед, ударная адиабата, моделирование, разрушение.

DOI: 10.15372/PMTF20190315

Исследование динамических свойств льда показывает, что моделирование его поведения в широком диапазоне скоростей нагружения является очень сложной задачей [1–4]. В работе [3] приведены ударные адиабаты льда для различных диапазонов массовых скоростей, возникающих за фронтом ударной волны. С учетом данных [3] полагаем, что при массовых скоростях $200 \div 1000$ м/с лед за фронтом ударной волны представляет собой смесь различных твердых фаз. Это предположение подтверждают результаты экспериментальных исследований, выполненных в работе [5], в которой построена кривая объемной сжимаемости льда, имеющая характерное плато в диапазоне $0,15 < \Delta V/V < 0,45$. Однако в расчетах лед моделировался сплошной средой без фазовых переходов с усредненными физико-механическими характеристиками [5–8]. Значения прочностных параметров, приведенные в работах [6–9], изменяются в пределах одного порядка. В данной работе используются значения прочностных параметров, близкие к приведенным в работе [9].

Целями настоящей работы являются проверка параметров модели льда по экспериментальным данным и проведение сравнения результатов моделирования разрушения ледяной преграды конечной толщины при ударе одиночного ударника и нескольких ударников.

В Институте теоретической и прикладной механики (ИТПМ) СО РАН разработана и изготовлена одноступенчатая газовая установка, позволяющая ускорять тела массой 0,5 кг

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. (код проекта АААА-А17-117030610136-3).

© Краус Е. И., Мельников А. Ю., Фомин В. М., Шабалин И. И., 2019

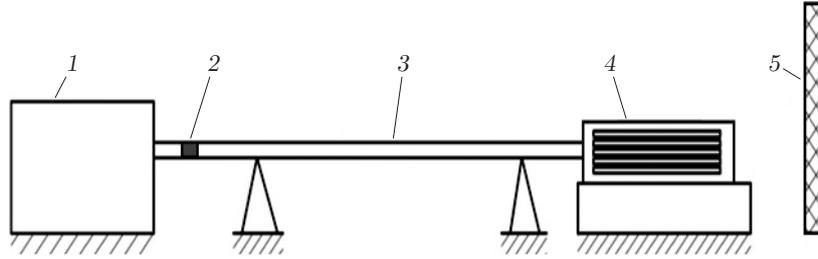


Рис. 1. Схема баллистической установки:

1 — ресивер, 2 — поддон с метаемым телом, 3 — баллистический ствол, 4 — отсекающий механизм и рамки-мишени, 5 — мишень

до скоростей 1200 м/с при длине ствола 20 м и диаметре 0,05 м. На рис. 1 представлена схема установки, состоящей из ресивера объемом 0,1 м³ и баллистического ствола со специальным устройством, удерживающим поддон с ударником. За отсекающим устройством, который отделяет поддон от метаемого тела, устанавливаются рамки мишени, что позволяет регистрировать скорость движения метаемого тела. Сигнал, поступающий с рамки-мишени, считывался высокоскоростным аналого-цифровым преобразователем NI-PCI-6255 с частотой дискретизации 500 кГц, что позволяет измерять скорость с точностью до 0,2 %.

Для верификации физико-механических параметров модели льда проведен ряд экспериментов по ударному нагружению массивных ледяных мишеней стальными бойками в форме цилиндра со следующими параметрами: диаметр $d_b = 1,5$ см, высота $h_b = 1,5$ см, масса $m_b \approx 20$ г. Для приготовления ледяных мишеней (диаметр $d_m = 26,2$ см, высота $h_m = 35,0$ см) пресная вода заливалась в пластиковые емкости и замораживалась при температуре -23 °С. В результате экспериментов по прониканию стальных ударников в ледяную преграду определена глубина кратера, составившая $L = 11,0; 11,5; 10,5$ см при скорости соударения $U = 191, 275, 285$ м/с соответственно.

Для моделирования процесса формирования кратера в ледяных мишенях использовался разработанный в ИТПМ СО РАН программный комплекс Reactor [10, 11], который прошел успешную апробацию при решении динамических задач деформирования и разрушения твердых тел. Математическая модель среды основана на лагранжевом подходе и включает следующие уравнения [12]:

— уравнения траектории движения материальных частиц

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

— уравнение неразрывности среды

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

— закон изменения импульса материальной частицы

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

— закон изменения внутренней энергии частицы

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

где $\dot{\epsilon}_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i})/2$ — тензор скоростей деформаций; $\sigma_{ij} = -\delta_{ij}P + s_{ij}$ — тензор напряжений; s_{ij} — девиатор тензора напряжений; δ_{ij} — символ Кронекера; ρ — плотность; P — функция давления в форме функции Ми — Грюнайзена [13] для стали. Для расчета ударной адиабаты льда использовалось соотношение Ренкина — Гюгонио с учетом линейной связи скорости ударной волны и массовой скорости:

$$D = a + \lambda U, \quad P = \frac{\rho a^2 (\rho / \rho_0 - 1)}{[\rho / \rho_0 - \lambda (\rho / \rho_0 - 1)]^2}.$$

Таблица 1

Параметры материалов, при которых проводились расчеты

Материал	ρ , кг/м ³	K , ГПа	G , ГПа	Y_0 , МПа	σ_1^* , МПа	ε^* , %	τ^* , %
Лед	920	9,72	3,64	2,3	12,4	12	17
Сталь	7870	171,00	80,00	230,0	780,0	25	25

Здесь D — скорость ударной волны; U — массовая скорость за фронтом ударной волны; a , λ — параметры материала. При этом, как показано в работах [3, 4], для каждой фазы льда выбирается собственная ударная адиабата.

Используются уравнения упругопластического течения Прандтля — Рейсса [14]

$$\hat{s}_{ij} + d\lambda' s_{ij} = 2G\dot{\varepsilon}'_{ij}$$

с условием пластичности Губера — Мизеса

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

где $\dot{\varepsilon}'_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{kk}/3$; Y_0 — динамический предел текучести; для определения скалярного множителя $d\lambda'$ используется известная процедура приведения компонент девиатора тензора напряжений к кругу текучести [14].

Поскольку материалы обладают конечной прочностью, в систему уравнений добавляются следующие критерии разрушения:

- критерий максимальной деформации растяжения $|\varepsilon_1| < \varepsilon^*$;
- критерий максимальной деформации сдвига $\tau_1 = (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2 < \tau^*$;
- критерий максимального касательного напряжения $\sigma_\tau = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 < \sigma_\tau^*$;
- модифицированный критерий разрушения Тулера — Бучера [15]

$$\sigma_t = \sum(\sigma_1 - \sigma_1^*)_i / \sum \Delta t_i > \sigma_t^*$$

(суммирование на временных слоях Δt_i выполняется при условии $\sigma_1 - \sigma_1^* > 0$).

В приведенных выше уравнениях использованы следующие обозначения: 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; G — модуль сдвига; $\varepsilon_1, \varepsilon_3$ — главные деформации; ε^*, τ^* — предельные значения деформаций на растяжение и сдвиг; σ_1, σ_3 — главные напряжения; $\sigma_\tau^*, \sigma_1^*, \sigma_t^*$ — предельные значения сдвиговых, откольных и накопленных напряжений. Параметры материалов, при которых проводились расчеты, приведены в табл. 1 (K — модуль объемного сжатия).

Расчетные области покрывались разностной сеткой без зазоров и перехлестов [16]. Метод построения конечно-разностных соотношений подробно изложен в работах [12, 14], там же приведено описание симметричного алгоритма расчета контактных границ для нестационарных задач.

Моделирование процесса образования каверны в массивной ледяной мишени при ударе стального цилиндра выполнено как в аксиальной двумерной, так и в трехмерной постановке. При внедрении ударника в поверхностные слои мишени лед разрушался, осколки, образующиеся на периферии ударника, выносились за пределы каверны. Фрагменты льда, находившиеся перед стальным цилиндром, уплотнялись и двигались вместе с ним до полной остановки.

В расчетах использовалась ударная адиабата для фазы льда VII ($a = 1340$ м/с, $\lambda = 1,4$). На рис. 2 представлены зависимости глубины пробития мишени от скорости,

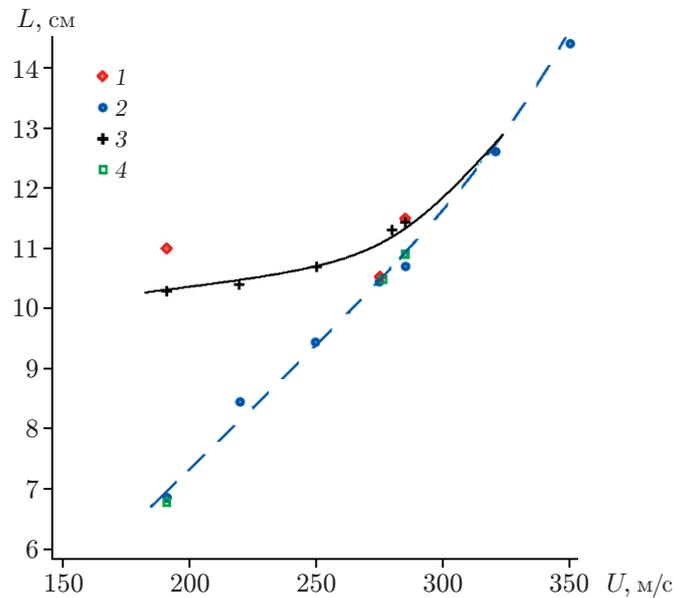


Рис. 2. Зависимость глубины каверны L от скорости соударения U :
 1 — экспериментальные данные; 2 — результаты двумерного расчета (фаза льда VII);
 3 — результаты двумерного расчета для смеси фаз льда VI и VII; 4 — результаты трех-
 мерного расчета (фаза льда VII); штриховая линия — расчетная зависимость $L(U)$ для
 уравнения состояния фазы льда VII, сплошная — расчетная зависимость для уравнения
 состояния смеси фаз льда VI и VII

Таблица 2

Зависимость радиуса R отверстия, полученного при пробитии ледяной мишени,
 и остаточной скорости ударника $U_{ост}$ от его радиуса r и высоты h

Форма ударника	r , см	h , см	Выбитое отверстие		$U_{ост}$, м/с
			R_{max} , см	R_{min} , см	
Одиночный диск	3,44	0,5	9,1	6,5	75
Кольцо	6,00 ÷ 5,48	1,0	10,0	7,7	32
Цилиндр (7 шт.)	0,75	1,5	Семь сквозных отверстий		136
Сфера (7 шт.)	0,8585	—	Семь сквозных отверстий		192
Малый диск (7 шт.)	1,06	0,5	9,2	7,2	33

полученные при решении как двумерной, так и трехмерной задачи. При значениях скорости удара $U = 275, 285$ м/с глубины каверны, полученные в расчетах и экспериментах, хорошо согласуются, а при $U = 191$ м/с существенно различаются. При использовании ударной адиабаты для фазы льда VI ($a = 388$ м/с, $\lambda = 2,61$) [3] глубина пробития составляет приблизительно 10,3 см при скорости удара $U = 191$ м/с. Таким образом, при описании процессов ударного нагружения ледяной преграды при малых скоростях необходимо использовать прямое численное моделирование смеси фаз льда VI и VII [17]. При этом объемная концентрация фазы льда VII линейно увеличивается от значения $\alpha_{VII} = 0$ при $U = 190$ м/с до значения $\alpha_{VII} = 1$ при $U = 300$ м/с. Применение такого подхода позволяет с достаточной точностью воспроизвести экспериментальную зависимость глубины кратера от скорости соударения (см. рис. 2).

Определив физико-механические параметры льда, рассмотрим задачу о пробивании отверстия в ледяной мишени при заданных скорости удара и массе ударника (нескольких

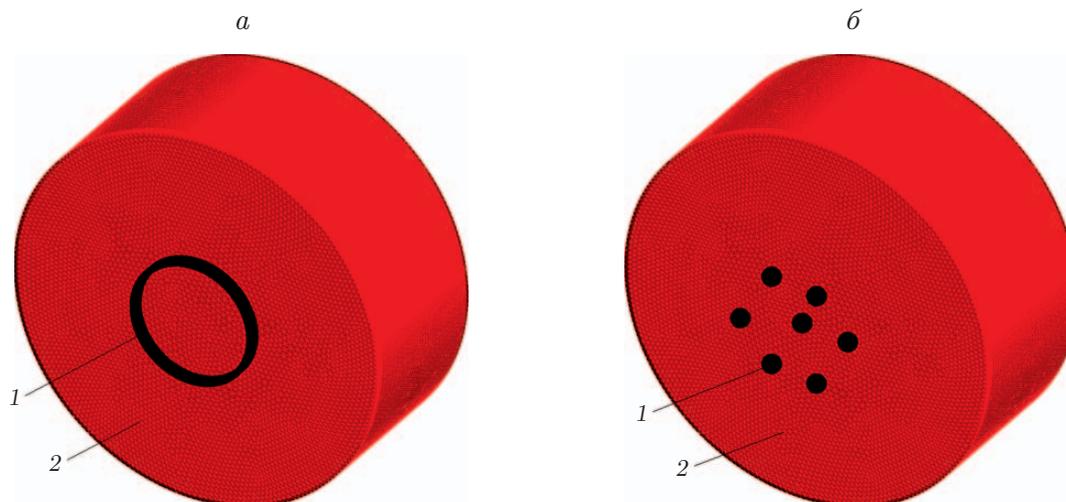


Рис. 3. Начальная геометрия задачи о соударении ледяной преграды и ударника в форме кольца (*a*) и семи сфер (*б*):
1 — высокопрочная сталь, 2 — лед

ударников). Пусть задана ледяная пластина конечной толщины, например $h_t = 15$ см. Требуется определить форму наибольшего отверстия, пробиваемого в ней одним или несколькими ударниками. Были выбраны следующие стальные ударники: 1) одиночный диск; 2) кольцо (рис. 3, *a*); 3) семь цилиндров; 4) семь сфер (рис. 3, *б*); 5) семь малых дисков. Суммарная масса всех ударников одинакова. Скорость соударения для всех рассматриваемых случаев составляла $U = 450$ м/с. Формы, размеры ударников и пробитых отверстий указаны в табл. 2 (R_{\min} , R_{\max} — минимальный и максимальный радиусы пробитого отверстия конической формы).

Приведем краткое описание отверстия в ледяной пластине, пробитого ударником (несколькими ударниками) каждого типа.

При соударении ударника с преградой (рис. 4, *a*) в ней распространяется импульс волны сжатия. В тот момент, когда импульс достигает свободной тыльной поверхности, начинается разгрузка. Взаимодействие двух волн разгрузки, распространяющихся с тыльной и лицевой поверхностей, приводит к формированию волны растяжения, которая вызывает откол (рис. 4, *б*). Диск, продолжая движение, разрушает лед и выносит его в область за преградой, при этом пробивается отверстие конической формы, поскольку диаметр кратера, образовавшегося на начальной стадии удара, больше диаметра отверстия на тыльной поверхности. На рис. 4 представлены результаты расчета процесса пробития ледяного блока стальным диском (мелкие осколки льда не показаны).

При ударе кольцом по ледяной преграде происходит выброс разрушенного льда в виде струи (рис. 5), направление которой противоположно направлению скорости удара. Данное явление обусловлено образованием кольцевого кратера, выброс внутри кольца представляет собой сходящийся поток фрагментов льда, что и приводит к формированию струйного течения. Продвижение кольца вглубь ледяной пластины приводит к образованию “пробки” и практически полному торможению кольца.

Известно, что удар группы тел по тонкой металлической преграде приводит к увеличению пробиваемого в ней отверстия [18, 19]. Разбиение массы ударника на семь частей обусловлено тем, что в этом случае края расположенных по кругу кратеров, образовавшихся в результате удара шести ударников небольшого размера, соприкасаются. Предполагалось, что центральное тело воздействует на выбиваемую “пробку” и удаляет ее из

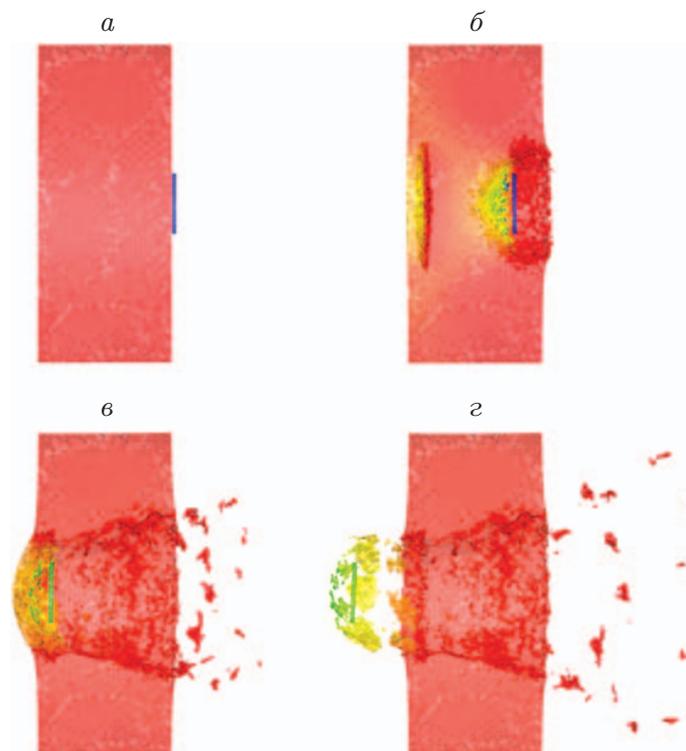


Рис. 4. Кинограмма процесса пробития стальным диском ледяного блока (разрез вдоль оси ледяного блока):
 а — $t = 0$, б — $t = 130$ мкс, в — $t = 1000$ мкс, г — $t = 2000$ мкс

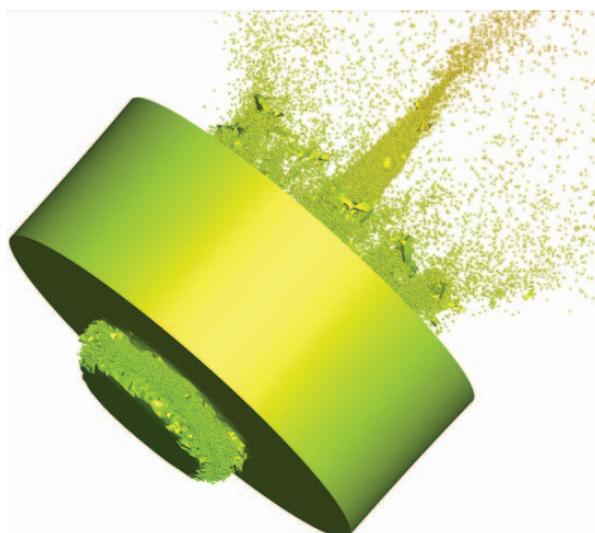


Рис. 5. Процесс пробития ледяного блока стальным кольцом ($t = 2000$ мкс)

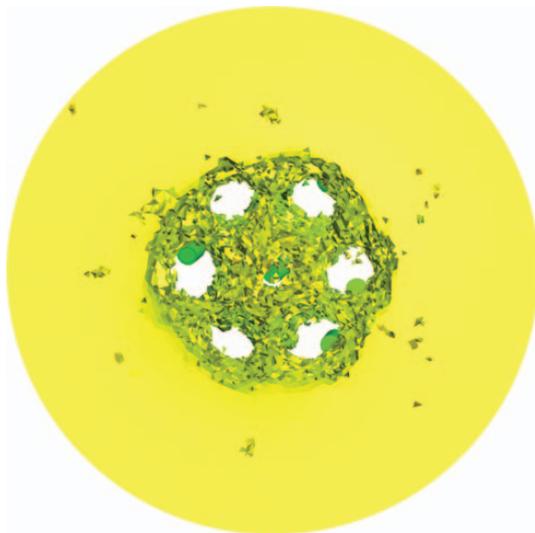


Рис. 6

Рис. 6. Ледяной блок с отдельными отверстиями, образовавшимися при ударе семи цилиндров ($t = 2000$ мкс)

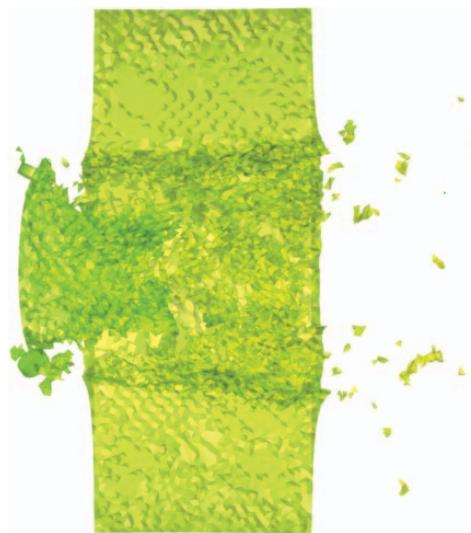


Рис. 7

Рис. 7. Выбивание “пробки” из ледяного блока семью малыми стальными дисками при $t = 2000$ мкс (разрез блока вдоль оси отверстия)

преграды. Однако удар семи цилиндров или семи сфер, размеры которых приведены в табл. 2, на конечной стадии процесса пробития приводит к возникновению семи сквозных отверстий, не образующих одно отверстие (рис. 6). При этом скорость ударников за преградой остается достаточно большой ($U_{ост} = 150$ м/с), тогда как при ударе семи малых дисков (радиус больше высоты) формируется одно отверстие и выбивается “пробка” (рис. 7).

Таким образом, в работе проведено прямое численное моделирование процесса пробития ледяной мишени ударниками различной формы.

Результаты численного моделирования показывают, что удар стальным кольцом по ледяной преграде конечной толщины приводит к образованию в ней отверстия наибольшего размера. Близкие результаты получены при ударе семью малыми стальными дисками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Millot M., Hamel S., Rygg J. R., et al. Experimental evidence for superionic water ice using shock compression // *Nature Phys.* 2018. V. 14. P. 297–302.
2. Gaffney E. S. Hugoniot of water ice // *Ices in the solar system*. Dordrecht: Springer, 1985. P. 119–148.
3. Stewart S. T., Ahrens T. J. Shock hugoniot of H₂O ice // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30, N 6. 1332. DOI: 10.1029/2002GL016789.
4. Stewart S. T., Ahrens T. J. Shock properties of H₂O ice // *J. Geophys. Res.: Planets.* 2005. V. 110. E03005. DOI: 10.1029/2004JE002305.
5. Баландин В. В., Крылов С. В., Повереннов Е. Ю., Садовский В. В. Численное моделирование ударного взаимодействия упругого цилиндра со льдом // *Пробл. прочности и пластичности.* 2017. Т. 79, № 1. С. 93–103.

6. Глазырин В. П. Ударное и взрывное нагружение льда // Изв. вузов. Физика. 2007. Т. 50, № 9/2. С. 60–64.
7. Герасимов А. В., Пашков С. В. Численное исследование 3D-процесса проникания ударников в лед // Мат. моделирование и краевые задачи. 2008. Ч. 1. С. 96–98.
8. Орлова Ю. Н., Глазырин В. П. Математическое моделирование процесса пробития тонкого льда цилиндрическим ударником // Тр. Том. гос. ун-та. Сер. физ.-мат. 2010. Т. 276. С. 56–59.
9. Лобанов В. А. Моделирование взаимодействия льда с конструкциями // Вестн. науч.-техн. развития. 2011. № 10. С. 31–39.
10. Kraus E. I., Shabalin I. I. Reactor2D: A tool for simulation of shock deformation // AIP Conf. Proc. 2016. V. 1770. 030092. DOI: 10.1063/1.4964034.
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. Фомин В. М. Высокоскоростное взаимодействие тел / В. М. Фомин, А. И. Гулидов, Г. А. Сапожников и др. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1990.
13. 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.
14. Wilkins M. L. Computer simulation of dynamic phenomena. Berlin; Heidelberg; N. Y.: Springer, 1999.
15. Tuler F. R., Butcher B. M. A criterion for the time dependence of dynamic fracture // Intern. J. Fracture Mech. 1968. V. 4, N 4. P. 431–437.
16. Kraus E. I., Shabalin I. I., Shabalin T. I. Automatic tetrahedral mesh generation for impact computations // AIP Conf. Proc. 2017. V. 1893. 30129.
17. Kraus E. I., Shabalin I. I., Shabalin T. I. Numerical analysis of wave propagation in a cermet composite // AIP Conf. Proc. 2017. V. 1893, N 1. 030130. DOI: 10.1063/1.5007588.
18. Хорев И. Е., Зелепугин С. А., Коняев А. А. и др. Разрушение преград группой высокоскоростных тел // Докл. АН. 1999. Т. 369, № 4. С. 481–485.
19. Герасимов А. В., Барашков В. Н., Пашков С. В. Удар группы компактных элементов по тонкой преграде // Изв. вузов. Физика. 2009. Т. 52, № 7/2. С. 59–63.

*Поступила в редакцию 11/X 2018 г.,
после доработки — 11/X 2018 г.
Принята к публикации 29/X 2018 г.*
