

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2025-87-3-354-364

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО
ЛЕДЯНОГО СФЕРИЧЕСКОГО УДАРНИКА
СО СТАЛЬНЫМИ ПЛАСТИНАМИ***

© 2025 г. Орлов М.Ю., Глазырин В.П., Фазылов Т.В.

Томский государственный университет, Томск, Российская Федерация

orloff_m@mail.ru

Поступила в редакцию 20.05.2025

Численно исследован отклик металлических пластин на высокоскоростной удар ледяной сферы. Представлен краткий анализ научной литературы по взаимодействию льда с различными конструкциями и установлено отсутствие значимых работ по моделированию в лагранжевой постановке разрушения льда при высокоскоростном ударе. Лед описывается моделью упруго-пластической сжимаемой пористой среды с учетом ударно-волновых явлений, а также совместного образования разрушений по типу отрыва и сдвига. Физико-механические характеристики льда взяты из общедоступной литературы. Расчеты проведены в двумерной осесимметричной постановке при помощи некоммерческого пакета прикладных программ «Удар Ос.1». Проведено сравнение результатов численных расчетов с экспериментальными результатами (в части скорости разрушения льда), полученными в баллистических лабораториях NASA. Анализ чувствительности сетки позволил достичь консервативного результата в части морфологии разрушения материалов, характере баллистических кривых и расчетных значений некоторых интегральных характеристик процесса и предложить конечно-элементную модель взаимодействующих тел. Установлено, что лед разрушался при доминирующем хрупком механизме, а металлические пластины – по механизму срезания пробки. В более толстых преградах формировался ударный кратер и наблюдалась пластическая деформация их тыльных поверхностей. Следствием сквозного пробития тонких преград являлся высокий уровень их пластической деформации. Время пробития и взаимодействия варьировалось от 16 до 92 мкс, причем наименьшие значения зафиксированы для самой тонкой и самой толстой преград. Получено, что стальная пластина толщиной 3 мм пробивалась ледяным ударником насквозь, а при увеличении толщины до 3,5 мм пластина не пробивалась.

Ключевые слова: лед, математическая модель, численные методы, пробитие, хрупкое разрушение, остаточная деформация.

* Выполнено за счет гранта РНФ № 24-29-00187, <https://rscf.ru/project/24-29-00187/>.

Введение

В настоящее время актуальным является изучение процессов поведения льда при ударных и взрывных нагрузках. Это обусловлено многочисленными практическими приложениями, в том числе поиском новых путей по борьбе с ледяными заторами на сибирских реках, необходимостью увеличения добычи природных ископаемых в районах вечной мерзлоты и Крайнего Севера. Успех реализации глобального проекта Северного морского пути во многом зависит от того, насколько глубоко будет достигнуто понимание процессов, протекающих при деформировании и разрушении льда.

Лед является весьма интересным с точки зрения разрушения природным материалом, так как почти не имеет аналогов. Некоторые специфические индивидуальные особенности разрушения льда приведены в [1]. Современные концепции разрушения льда все еще разрабатываются, и определенный успех уже достигнут при использовании численных методов для изучения его деформирования и разрушения [2, 3]. При этом очевидно, что любые численные результаты должны согласовываться с экспериментальными, которые, в свою очередь, могут быть и противоречивыми [4–6]. Несмотря на все достижения в этой области, еще долго будут востребованы новые физико-математические модели, критерии разрушения и численные методы расчетов процессов деформирования и разрушения льда [7]. В [8] для определения свойств льда при высокоскоростной деформации применен метод Кольского с различными вариантами стресса Гопкинсона. Экспериментально исследовано влияние температуры на прочность льда. При помощи современных баллистических установок методами импульсного рентгенографирования исследован процесс пробития ледяных преград ударником с плоским торцом для определения влияния температуры льда на его прочность, коэффициент сопротивления и размер каверны [9]. При помощи пакета прикладных программ Upsgod-2D проведено численное моделирование процессов соударения ледяного шарика с преградой и составного конуса с ледяной мишенью [10]. Удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных результатов свидетельствует об адекватности разработанных средств математического моделирования. Четырехэтапный процесс кратерообразования (контакт и сжатие, начальное развитие повреждений и выброс поврежденного материала) в водяном льде смоделирован в эйлеровой постановке при помощи пакета прикладных программ СТН (Сандия, США) [11]. Получено, что поврежденный объем льда был пропорционален импульсу ударника.

Пакет прикладных программ YADE позволяет вполне успешно моделировать процессы разрушения льда при использовании метода дискретных элементов и модели связанных частиц с повреждением [12]. Методами численного моделирования исследованы процессы ударного взаимодействия упругого цилиндра со льдом, проведен анализ динамики развития повреждений и определена сила сопротивления прониканию при различных начальных скоростях [13]. При помощи комплекса программ Reactor 3D установлено, что удар металлического кольца по ледяной мишени приводит к наибольшему объему выброса льда и почти полной потере кинетической энергии кольца [14]. Упругопластическая модель поведения поликристаллического льда с динамическим разрушением была разработана в ИПМ РАН [15]. Взаимодействие низкоскоростного ледяного ударника (разной заморозки) со стальными и композитными сэндвич-преградами изучено в [16]. Численное моделирование гиперсверхскоростного удара льда при помощи лагранжева бессеточного метода успешно предпринято в [17].

В настоящей статье приведены результаты численных исследований пробивного действия высокоскоростного сферического ледяного ударника по монолитной стальной преграде.

Модель и метод

Для описания поведения материалов, включая лед, использовалась модель механики сплошных сред, основанная на феноменологическом макроскопическом подходе. Среда является упругопластической, пористой, сжимаемой, учитывающей свойства прочности, ударно-волновые явления и совместное образование разрушений по типу отрыва и по типу сдвига. Определяющие соотношения задаются уравнениями Прандтля – Рейса при условии текучести Мизеса. Уравнение состояния для стали взято в форме Уолша. В процессе счета допускается появление новых свободных поверхностей, в том числе разделяющих рассматриваемые тела на отдельные фрагменты. Это достигается путем одновременного использования нескольких критериев разрушения в рамках детерминированного подхода к его описанию.

В качестве основного инструмента исследований использовался численный лагранжев метод, расчетная часть которого была дополнена механизмами расщепления расчетных узлов и разрушения расчетных элементов. Конечно-элементное (КЭ) моделирование проведено в двумерной осесимметричной постановке при помощи некоммерческого пакета прикладных программ «Удар.Ос.1» [18].

Тестовые расчеты, анализ чувствительности

Тестовые расчеты направлены на проверку как физико-математической модели, так и алгоритмов расчетов, а анализ чувствительности сетки – на получение консервативных результатов и экономии вычислительных ресурсов [19].

Тестовые расчеты (количественный тест). Одним из основных тестов был лабораторный эксперимент, проведенный в лаборатории NASA [20]. Полученный в искусственных условиях ледяной цилиндр размерами в сечении $1,75 \times 4,22$ см ударялся о жесткую стенку со скоростью 213 м/с. Высокоскоростная камера фиксировала процесс соударения на всех этапах его разрушения. Экспериментальным методом была определена скорость волны разрушения во льду, равная 2438 м/с.

На рис. 1 показано продольное сечение ледяного цилиндра, полученное численно, в момент времени 8 мкс.

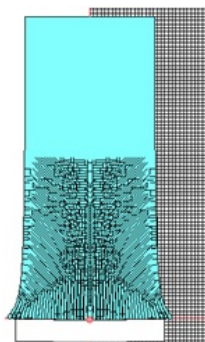


Рис. 1. Продольное сечение ледяного цилиндра в момент времени 8 мкс
(цена деления 0,05 см)

На рисунке видна жесткая стенка (плита из высокопрочного алюминия), маркером выделено начало координат. Волна разрушения во льду (фронт очагов разрушений распространяется снизу вверх) за 8 мкс достигла высоты приблизительно 2,18 см. Таким образом, скорость волны составила 2725 м/с, что довольно близко к экспериментальному значению.

Анализ чувствительности сетки. Анализ чувствительности сетки выполнен для нахождения консервативного результата численного решения при разумной экономии вычислительных ресурсов. Для этого были построены пять КЭ-моделей взаимодействующих тел, в том числе с областью сгущения треугольных элементов в зоне контакта ударника и мишени. Под областью сгущения понималась зона в мишени толщиной 1 мм, равная почти трем радиусам сферы. КЭ-модели построены автоматически при помощи программы-оболочки пакета прикладных программ «Удар.Ос.1». Расчетными элементами являлись трехузловые триангуляционные элементы, количество которых варьировалось от 6000 до 9000 штук. Минимальное количество элементов было в варианте КЭ-модели без сгущения, а максимальное – в варианте с частым сгущением. Предметом сравнения была морфология разрушения, вид баллистических кривых и величина некоторых интегральных характеристик процесса.

На рис. 2 показаны зависимости от времени поврежденности льда и скорости его центра масс для всех моделей.

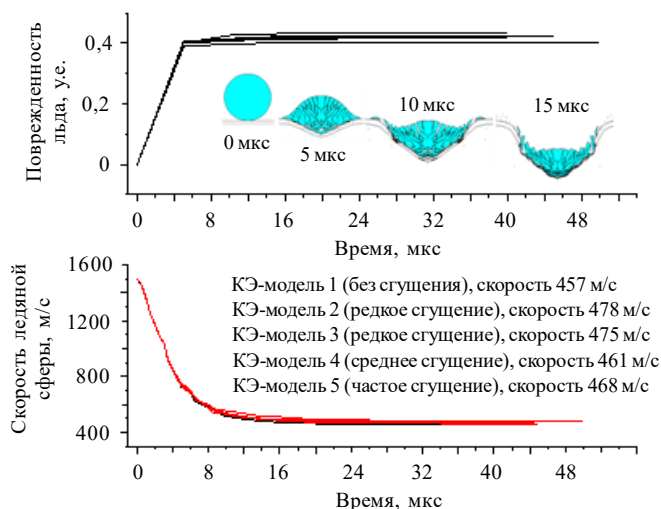


Рис. 2. Зависимости от времени поврежденности льда и его скорости для пяти КЭ-моделей

Заметим, что достигнут консервативный результат, заключающийся в том, что кривые на графике имеют очень похожий вид. Так, поврежденность льда резко растет в начале процесса, достигая почти 40%, что в лабораторном эксперименте соответствует его полному разрушению. Фрагмент рассчитанных конфигураций ударник–мишень, изображенный на верхнем графике, вполне адекватно передает эту картину. Кривые скорости, близкие к гиперболической функции, также почти сливаются на графике. Расчетные значения запреградных скоростей получились вполне близкими друг другу, в варианте КЭ-модели без сгущения (модель 1) расчетное значение составило 457 м/с.

Исходя из полученных результатов, была выбрана КЭ-модель (модель 5), размер

элементов в которой в приконтактной зоне равен размеру элементов в первой КЭ-модели.

Исследования процесса пробития монолитных и многослойных стальных преград сферическим ледяным ударником

Ударник и мишени. Объектом исследования была монолитная металлическая пластина конечной толщины из мягкой стали Ст3. Толщина пластины увеличивалась от 0,1 мм шагами по 0,5 мм до тех пор, пока пробитие пластины ударником не прекратилось. В качестве ударника использована ледяная сфера диаметром 12,7 мм, начальная скорость которой была 1500 м/с. Физико-механические характеристики льда приведены в [18]. Серия вычислительных экспериментов состояла из 9 вариантов, начальная скорость ударника и его размеры не менялись.

Для удобства в обозначении преград была указана их толщина: например, (50) означало, что в качестве мишени выбрана преграда толщиной 5 мм. Предметом исследования было состояние взаимодействующих тел, включая время взаимодействия, морфологию разрушения материалов и некоторые интегральные характеристики процесса.

Динамика разрушения материалов. Проведенные расчеты позволили выявить картину разрушения материалов на различных стадиях взаимодействия. Установлено, что в первых пяти вариантах преграда была перфорирована, а в остальных четырех – нет. Выявлено, что стадия предразрушения льда, когда во льду отсутствовали трещины, но он «растекался» в радиальном направлении, длилась только на первой микросекунде. Обнаружено, что за первые 2,5 мкс ледяная сфера теряла почти треть от первоначальной скорости. Со второй микросекунды начинался процесс растрескивания льда и прогиб мишеней в направлении движения ударника. На 5-й мкс процесс завершался хрупким разрушением, лед терял свою исходную форму и ударник полностью разрушался на мелкие фрагменты. В мишени начинала формироваться пробоина, причем увеличение толщины мишени заставляло ударник быстрее тормозить, что вполне очевидно. В последних пяти вариантах с лицевой стороны был сформирован ударный кратер, а на тыльной стороне имело место выпучивание материала в осевом направлении. Установлено, что чем тоньше была преграда, тем больше был уровень ее остаточной деформации. С увеличением толщины преграды ее прогиб в осевом направлении имел место во всех вариантах расчетов.

На рис. 3 приведены конечные конфигурации мишеней с минимальной и максимальной толщиной. Видно, что процесс пробития преграды (10) завершен уже на 16-й мкс, а деформационная картина в мишени (50) окончательно сформировалась за 20 мкс.

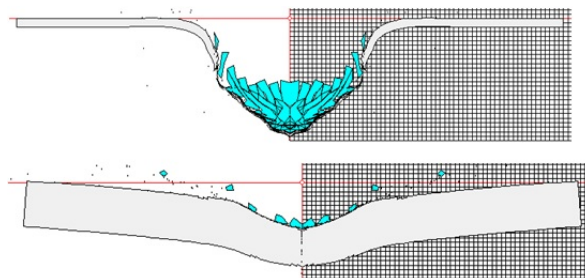


Рис. 3. Пластины (10) и (50) на конечных стадиях процесса

Расчетным путем установлено, что ледяная сфера выбивала «пробку» из стальной преграды: в преграде (30) ее диаметр составил 1,05 мм, то есть меньше, чем исходный диаметр сферы. В вариантах без пробития отмечено выпучивание пластины в осевом направлении и уменьшение времени взаимодействия с увеличением ее толщины.

Профили скорости свободной поверхности для первых шести вариантов расчетов представлены на рис. 4. Видно, что скорость свободной поверхности уменьшалась с увеличением толщины преграды. В первом случае скорость достигла почти 900 м/с, во втором – 650 м/с, в третьем – 474 м/с, в четвертом – 348 м/с, а в – пятом 56 м/с. В шестом варианте при отсутствии сквозного пробития скорость составила всего 23 м/с. Отметим, что в шестом и пятом вариантах профили скорости имели почти одинаковый вид. После достижения ударником тыльной поверхности наблюдалось резкое снижение его скорости, а после 50 мкс – стремление скорости к нулю. На правом рисунке показана осевая координата преграды в контрольной точке, по которой можно судить о ее прогибе. Видно, что преграды (35) и (40) деформировались в течение почти всего процесса, а преграды (45) и (50) – только 2/3 времени взаимодействия. Установлено, что остаточная деформация преград (50) и (45) практически равнялась их толщине, а для преград (35) и (40) была больше чем в 2 и 1,5 раза.

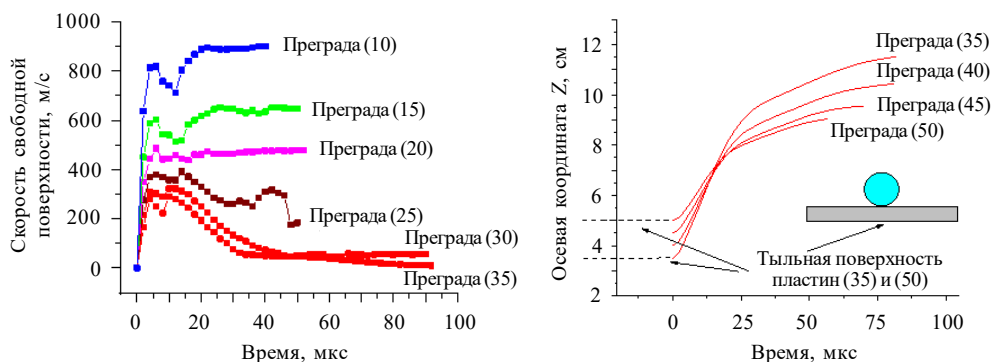


Рис. 4. Профили скорости свободных поверхностей и осевой координаты

Результаты расчетов. В таблице 1 приведены результаты расчетов процесса соударения ледяной сферы с девятью преградами. Расчетным путем получены значения скорости ледяной сферы, время ее взаимодействия с преградами, поглощенная преградами энергия, диаметр пробойны (в случаях сквозного пробития), поврежденность льда и качественно оценен уровень остаточной деформации преград.

Таблица 1

Результаты расчетов									
Порядковый номер вычислительного эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Толщина пластины, мм	1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Запреградная скорость, м/с	457	252	156	36	21	–	–	–	–
Время, мкс	16	20	24	40	76	92	53	24	20
Энергия поглощения, Дж	1000	1071	1090	1101	1102				

Таблица 1 (продолжение)

Порядковый номер вычислительного эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Диаметр пробоины, мм	1,97	1,72	1,61	1,26	1,22				
Поврежденность льда, %	30,5	39,8	41,2	41,7	43,0	42	43,5	43,5	42,6
Остаточная деформация	Сильная остаточная деформация					Средняя деформация		Слабая деформация	

Время пробития рассчитывалось как момент выхода ударника из преграды, время взаимодействия – как время достижения нуля запреградной скоростью.

В вариантах со сквозным пробитием получено, что с увеличением толщины преграды запреградная скорость ледяной сферы уменьшается с 457 м/с в первом варианте до 21 м/с в пятом варианте. При этом время взаимодействия, наоборот, увеличивалось с 16 до 92 мкс. Наименьшее время пробития/взаимодействия зафиксировано в случаях с минимальной и максимальной толщинами преград. Энергия поглощения достигала значений от 1000 до 1102 Дж. Выявлено, что диаметр пробоин уменьшался с увеличением толщины преграды и в варианте (30) стал меньше исходного диаметра ударника. Что касается поврежденности льда, то ее минимальное значение зафиксировано для преграды (10). В остальных случаях рассчитанные значения поврежденности были близки друг к другу и не превышали 44%. Также установлено, что уровень остаточной деформации слоев уменьшался от сильного до слабого с увеличением их толщины.

Выводы

Проведенный анализ научно-технической и патентной литературы указывает на возросший интерес к «ледовой» тематике и на недостаток работ, связанных с изучением ударной стойкости металлических конструкций, содержащих внутри себя ледяные блоки. В условиях низкоскоростного удара, по мнению авторов, непористый лед (пористость < 0,5%) может повысить ударную стойкость конструкции, если будет располагаться в ее определенных частях. В Томском государственном университете более 10 лет ведутся поисковые научные исследования, объектами изучения которых является искусственный, естественный лед, а также речной ледяной покров четырех типов. Как было показано в [1], в некоторых случаях поведение льда в условиях динамической нагрузки труднопредсказуемо. Рисунок 5 в какой-то мере обобщает полученные результаты, описанные выше.

Расчетным путем установлено, что предельная толщина пробития, вероятнее всего, находится между 3,0 и 3,5 мм. Установлено, что лед разрушался по хрупкому механизму, пробивая тонкие преграды с толщиной до 3,0 мм включительно и образуя ударный кратер при сильной и слабой деформации тыльного слоя в толстых преградах толщиной более 3,5 см. Чем меньше была толщина преграды, тем больше были ее остаточная деформация и запреградная скорость ударника. Время процесса (время пробития и взаимодействия) варьировалось от 16 до 90 мкс, причем наименьшие значения отмечены для самой тонкой и самой толстой преград.

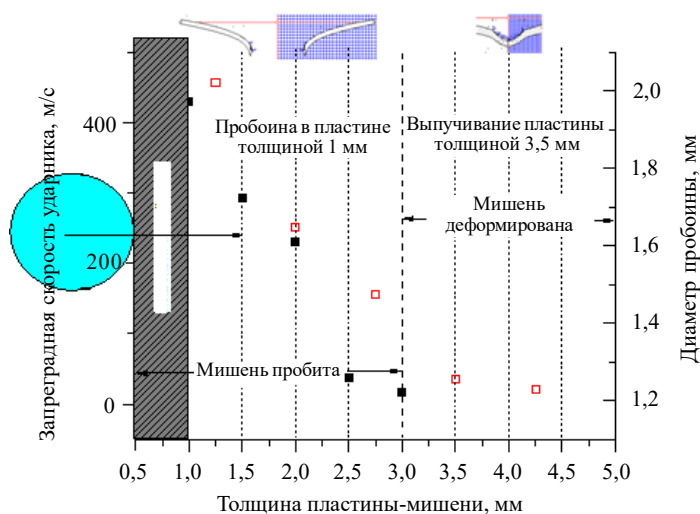


Рис. 5. Запреградная скорость и диаметр пробоины в зависимости от толщины преграды

Список литературы

1. Epifanov V.P. Rupture and dynamic hardness of ice. *Doklady Physics*. 2004. Vol. 49. P. 86–89. <https://doi.org/10.1134/1.1686876>.
2. Гриневич Д.В., Бузник В.М., Нужный Г.А. Обзор применения численных методов для моделирования деформации и разрушения льда. *Труды ВИАМ*. 2020. №8(90). С. 109–122.
3. Xue Y., Liu R., Li Z., Han D. A review for numerical simulation methods of ship-ice interaction. *Ocean Engineering*. 2020. Vol. 215. Article No 107853. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107853>.
4. Zhang Y., Liu R., Yuan L., Li J., Jing C., Han D. Ice breaking by low-velocity impact with a rigid sphere. *International Journal of Impact Engineering*. 2023. Vol. 182. Article No 104786. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104786>.
5. Combescure A., Chuzel-Marmot Y., Fabis J. Experimental study of high-velocity impact and fracture of ice. *International Journal of Solids and Structures*. 2011. Vol. 48. Iss. 20. P. 2779–2790. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2011.05.028>.
6. Imbert M., Kilchert S., Maurer M., May M. Experimental investigation of hail impacts over a wide range of high velocities. *International Journal of Impact Engineering*. 2023. Vol. 178. Article No 104627. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104627>.
7. Orlov M.Y., Orlova Y.N. Research of the destruction of ice under shock and explosive loads. In: *Multiscale Solid Mechanics*. Eds. H. Altenbach, V.A. Eremeyev, L.A. Igumnov. Vol. 141. Cham, Switzerland: Springer, 2021. P. 363–376. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54928-2_27.
8. Bragov A., Igumnov L., Konstantinov A., Lomunov A., Filippov A., Shmotin Y., Didenko R., Krundaeva A. Investigation of strength properties of freshwater ice. *EPJ Web Conferences*. 2015. Vol. 94. Article No 01070. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20159401070>.
9. Герасимов С.И., Зубанков А.В., Кривошеев О.В. и др. Исследование пробития ледовой преграды цилиндрическим ударником. *Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»*. 2020. Т. 9. №2. С. 95–99. <https://doi.org/10.1134/S2304487X20020042>.
10. Глазова Е.Г., Крылов С.В., Чекмарев Д.Т. Численное моделирование удара ледяной сферы о преграду. *Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки*. 2020. Т. 162. №2. С. 137–147. <https://doi.org/10.26907/2541-7746.2020.2.137-147>.
11. Sherburn J.A., Horstemeyer M.F. Hydrodynamic modeling of impact craters in ice.

International Journal of Impact Engineering. 2010. Vol. 37. Iss. 1. P. 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.07.001>.

12. Grinevich D.V., Buznik V.M., Nyzhnyi G.A. Numerical simulation of ice fracture by compression using of the discrete element method. *Materials Physics and Mechanics*. 2023. Vol. 51. Iss. 3. P. 75–87. DOI: 10.18149/MPM.5132023_10.

13. Баландин В.В., Крылов С.В., Повереннов Е.Ю., Садовский В.В. Численное моделирование ударного взаимодействия упругого цилиндра со льдом. *Проблемы прочности и пластичности*. 2017. Т. 79. №1. С. 93–103. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2017-79-1-93-103>.

14. Краус Е.И., Мельников А.Ю., Фомин В.М., Шабалин И.И. Пробитие ледяных преград конечной толщины стальными ударниками. *Прикладная механика и техническая физика*. 2019. Т. 60. №3. С. 146–153. DOI: 10.15372/PMTF20190315.

15. Гусева Е.К., Епифанов В.П., Голубев В.И., Петров И.Б. Упругопластическая модель льда с динамическим разрушением для описания тонкой структуры льда. *Математическое моделирование в механике: материалы докладов Всероссийской конференции*. Красноярск, 18–20 сент. 2024 г. Красноярск: Институт вычислительного моделирования СО РАН, 2024. С. 51–54.

16. Banik A., Zhang C., Khan M.H., Wilson M., Tan K.T. Low-velocity ice impact response and damage phenomena on steel and CFRP sandwich composite. *International Journal of Impact Engineering*. 2022. Vol. 162. Article No 104134. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.104134>.

17. Jiang H., Wang H., Scott V., Li B. Numerical analysis of oblique hypervelocity impact damage to space structural materials by ice particles in cryogenic environment. *Acta Astronautica*. 2022. Vol. 195. P. 392–404. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.02.029>.

18. Орлов М.Ю., Глазырин В.П., Фазылов Т.В. Исследование процесса пробития конструкций из льда и тонких металлических пластин. *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2025. Т. 31. №1. С. 127–141. DOI: 10.33113/mkmmk.ras.2025.31.01.10.

19. Orlov M.Yu., Glazyrin V.P., Orlova Yu.N. Impact resistance of design composed of ice block and thin metal plate impacted by high-velocity ogival projectile. *Proceedings of the XII All Russian Scientific Conference on Current Issues of Continuum Mechanics and Celestial Mechanics*. In: *Springer Proceedings in Physics*. Vol. 412. Singapore: Springer, 2023. P. 225–233. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1872-6_32.

20. Carney K., Benson D., Dubois P., Lee R. A phenomenological high strain rate model with failure for ice. *International Journal of Solids and Structures*. 2006. Vol. 43. Iss. 25-26. P. 7820–7839. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2006.04.005>.

References

1. Epifanov V.P. Rupture and dynamic hardness of ice. *Doklady Physics*. 2004. Vol. 49. P. 86–89. <https://doi.org/10.1134/1.1686876>.

2. Grinevich D.V., Buznik V.M., Nuzhnyi G.A. Obzor primeneniya chislennykh metodov dlya modelirovaniya deformatsii i razrusheniya lda [Review of numerical methods for simulation of the ice deformation and fracture]. *Trudy Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta aviatsionnykh materialov* [Proceedings of the All-Russian Institute of Aviation Materials]. 2020. No 8(90). P. 109–122 (In Russian).

3. Xue Y., Liu R., Li Z., Han D. A review for numerical simulation methods of ship-ice interaction. *Ocean Eng.* 2020. Vol. 215. Article No 107853. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107853>.

4. Zhang Y., Liu R., Yuan L., Li J., Jing C., Han D. Ice breaking by low-velocity impact with a rigid sphere. *Int. J. Impact Eng.* 2023. Vol. 182. Article No 104786. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104786>.

5. Combescur A., Chuzel-Marmot Y., Fabis J. Experimental study of high-velocity impact and fracture of ice. *International Journal of Solids and Structures*. 2011. Vol. 48. Iss. 20. P. 2779–2790. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2011.05.028>.

6. Imbert M., Kilchert S., Maurer M., May M. Experimental investigation of hail impacts

over a wide range of high velocities. *Int. J. Impact Eng.* 2023. Vol. 178. Article No 104627. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104627>.

7. Orlov M.Y., Orlova Y.N. Research of the destruction of ice under shock and explosive loads. In: *Multiscale Solid Mechanics*. Eds. H. Altenbach, V.A. Eremeyev, L.A. Igumnov. Vol. 141. Cham, Switzerland. Springer. 2021. P. 363–376. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54928-2_27.

8. Bragov A., Igumnov L., Konstantinov A., Lomunov A., Filippov A., Shmotin Y., Didenko R., Krundaeva A. Investigation of strength properties of freshwater ice. *EPJ Web Conferences*. 2015. Vol. 94. Article No 01070. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20159401070>.

9. Gerasimov S.I., Zubankov A.V., Krivosheev O.V. et al. Issledovanie probitiya ledovoy pregrady tsilindricheskim udarnikom [Study of the penetration of a cylindrical striker through an ice barrier]. *Vestnik Natsionalnogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI"*. 2020. Vol. 9. No 2. P. 95–99 (In Russian).

10. Glazova E.G., Krylov S.V., Chekmarev D.T. Chislennoe modelirovanie udara ledyanoy sfery o pregradu [Numerical simulation of the ice sphere impact onto the barrier]. *Uchenye Zapiski Kazanskogo universiteta. Ser. Fiziko-matematicheskie nauki*. 2020. Vol. 162. No 2. P. 137–147 (In Russian).

11. Sherburn J.A., Horstemeyer M.F. Hydrodynamic modeling of impact craters in ice. *Int. J. Impact Eng.* 2010. Vol. 37. Iss. 1. P. 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.07.001>.

12. Grinevich D.V., Buznik V.M., Nyzhnyi G.A. Numerical simulation of ice fracture by compression using of the discrete element method. *Mater. Phys. Mech.* 2023. Vol. 51. Iss. 3. P. 75–87. DOI: 10.18149/MPM.5132023_10.

13. Balandin V.V., Krylov S.V., Poverennov E.Yu., Sadovskiy V.V. Chislennoe modelirovanie udarnogo vzaimodeystviya uprugogo tsilindra so ldom [Numerical modeling of shock interaction of elastic cylinder with ice]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2017. Vol. 79. No 1. P. 93–103.

14. Kraus E.I., Melnikov A.Yu., Fomin V.M., Shabalin I.I. Probitie ledyanykh pregrad konechnoy tolshchiny stalnymi udarnikami [Penetration of ice barriers of finite thickness by steel strikers]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]*. 2019. Vol. 60. No 3. P. 146–153 (In Russian).

15. Guseva E.K., Epifanov V.P., Golubev V.I., Petrov I.B. Uprugoplasticheskaya model lda s dinamicheskim razrusheniem dlya opisaniya tonkoy struktury lda [Elastoplastic model of ice with dynamic fracture for describing its fine structure]. *Matematicheskoe modelirovanie v mekhanike: materialy dokladov Vserossiyskoy konferentsii [Mathematical Modeling in Mechanics: Proceedings of the All-Russian Conference]*. Krasnoyarsk. 18–20 Sent. 2024. Krasnoyarsk. Institute of Computational Modelling SB RAS. 2024. P. 51–54 (In Russian).

16. Banik A., Zhang C., Khan M.H., Wilson M., Tan K.T. Low-velocity ice impact response and damage phenomena on steel and CFRP sandwich composite. *Int. J. Impact Eng.* 2022. Vol. 162. Article No 104134. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.104134>.

17. Jiang H., Wang H., Scott V., Li B. Numerical analysis of oblique hypervelocity impact damage to space structural materials by ice particles in cryogenic environment. *Acta Astronaut.* 2022. Vol. 195. P. 392–404. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.02.029>.

18. Orlov M.Yu., Glazyrin V.P., Fazylov T.V. Issledovanie protsessa probitiya konstruktivnykh izo lda i tonkikh metallicheskih plastin [Study of the process of breaking through structures made of ice and thin metal plates]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktivnykh [Mechanics of Composite Materials and Structures]*. 2025. Vol. 31. No 1. P. 127–141 (In Russian).

19. Orlov M.Yu., Glazyrin V.P., Orlova Yu.N. Impact resistance of design composed of ice block and thin metal plate impacted by high-velocity ogival projectile. *Proceedings of the XII All Russian Scientific Conference on Current Issues of Continuum Mechanics and Celestial Mechanics*. In: *Springer Proceedings in Physics*. Vol. 412. Singapore. Springer. 2023. P. 225–233. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1872-6_32.

20. Carney K., Benson D., Dubois P., Lee R. A phenomenological high strain rate model with failure for ice. *International Journal of Solids and Structures*. 2006. Vol. 43. Iss. 25-26. P. 7820–7839. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2006.04.005>.

NUMERICAL SIMULATION OF BEHAVIOUR OF METAL PLATE SUBJECTED TO ICE SPHERE IMPACT*

Orlov M.Yu., Glazyrin V.P., Fazylov T.V.

Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

orloff_m@mail.ru

Received by the Editor 2025/05/20

The paper presents a numerical study of the response of metal plates to the impact of an ice sphere with an initial velocity of 1500 m/s. A brief analysis of the scientific literature on the interaction of ice with various structures is presented, and the absence of full-length papers in which ice structures and thin steel plates served as targets is established. Ice is described by a model of an elastic-plastic compressible porous medium taking into account shock-wave phenomena, as well as the combined formation of failures by the type of separation and shear. The physical and mechanical characteristics of ice are taken from open available literature. The calculations are carried out in a 2D axisymmetric formulation using the non-commercial software package "Impact Os.1". A comparison of the numerical results with the experimental results (in terms of the ice failure rate) obtained in the NASA ballistic laboratories is performed. The mesh sensitivity analysis made it possible to achieve a conservative result (in terms of the morphology of material failure, the nature of ballistic curves, and the calculated values of some integral characteristics of the process) and to propose a finite element model of interacting bodies. It was found that ice was destroyed by a dominant brittle mechanism, while metal plates were destroyed by a piercing mechanism. In thicker targets, an impact crater was formed and plastic deformation of the back surface was observed. After through penetration of thin plates, a high level of their plastic deformation was established. The perforation and interaction time varied from 16 to 92 μ s, with the lowest value recorded for the thinnest and thickest plates. It was found that a 3 mm steel plate was penetrated through by an ice striker, and when its thickness increased to 3.5 mm, it was not penetrated.

Keywords: ice, mathematical model, finite-elements method, penetration, brittle failure, permanent deformation.

* The study was supported by the Russian Science Foundation, grant No 24-29-00187, <https://rscf.ru/project/24-29-00187/>.