

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБИТИЯ ЛЕДОВОЙ ПРЕГРАДЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ УДАРНИКОМ

© 2020 г. С. И. Герасимов^{1,2,3,*}, А. В. Зубанков^{1,2}, О. В. Кривошеев¹, А. П. Калмыков¹,
С. А. Капинос¹, А. А. Глухов², В. В. Писецкий², Р. В. Герасимова²

¹Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, 607190, Россия

²Саровский физико-технический институт –
филиал Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”, Саров, 607186, Россия

³Институт проблем машиностроения РАН – филиал Института прикладной физики РАН,
Нижний Новгород, 603024, Россия

*e-mail: s.i.gerasimov@mail.ru

Поступила в редакцию 26.10.2019 г.

После доработки 06.11.2019 г.

Принята к публикации 24.12.2019 г.

В работе приведены результаты исследования пробития ледовых преград цилиндрическими ударниками с плоским торцом, пробитие осуществлялось по нормали к лицевой поверхности преграды. Рассмотрена возможность использования индукционных сечений для фиксации по времени ударников при исследовании пробития пресной ледовой преграды в диапазоне начальных скоростей от 800 до 1500 м/с. Экспериментально получены диаграммы движения (зависимость глубины от времени) и размеры образующихся каверн методом импульсного рентгенографирования. По результатам проведенных испытаний и анализа результатов определены влияние температуры льда на его прочность, коэффициент сопротивления и размер каверны.

Ключевые слова: индукционное сечение, пресная ледовая преграда, метод импульсного рентгенографирования, каверна, динамическая твердость

DOI: 10.1134/S2304487X20020042

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы во всем мире расширяются исследования по физике, химии и механике льда с привлечением современных методов, заимствованных из физики твердого тела, квантовой химии, машинного моделирования и т.д. Знание физико-механических характеристик льда необходимо для решения целого ряда прикладных технических задач, связанных с эффективностью применения ракетно-артиллерийского оружия.

Многочисленные известные работы [1–4] посвящены, главным образом, исследованиям прочности и трещиностойкости пресноводного поликристаллического льда при динамических нагрузках.

Основными факторами, влияющими на прочность льда, являются температура, скорость нагружения, тип льда, структура кристаллов, размер образцов.

Лед обладает уникальными физическими свойствами — необычные пластические свойства, квазижидкий поверхностный слой, значительная протонная проводимость, полностью разупорядоченная водородная подрешетка и т.д.

В то же время поликристаллический лед является полезным модельным материалом в фундаментальных исследованиях в области механики твердого тела. Традиционным и, в конечном счете, определяющим с точки зрения последующих инженерно-технических приложений является изучение физико-механических свойств льда, в том числе при ударно-взрывном нагружении [5–12].

В работе приведены результаты исследования пробития ледовых преград цилиндрическими ударниками с плоским торцом, калибра 10 и 14.5 мм в диапазоне скоростей от 800 до 1500 м/с, пробитие осуществлялось по нормали к лицевой поверхности преграды. Преграда представляла собой пресный лед, изготовленный в климатической камере в течение ~72 часов с постепенным изменением температуры внутри камеры, в среднем на минус 5°C — минус 10°C в сутки. Данный образец льда моделировал пресный природный лед в диапазоне температур от минус 3°C до минус 32°C.

Плотность льда принималась равной табличному значению — 900 кг/м³ [13]. Задачами экспе-

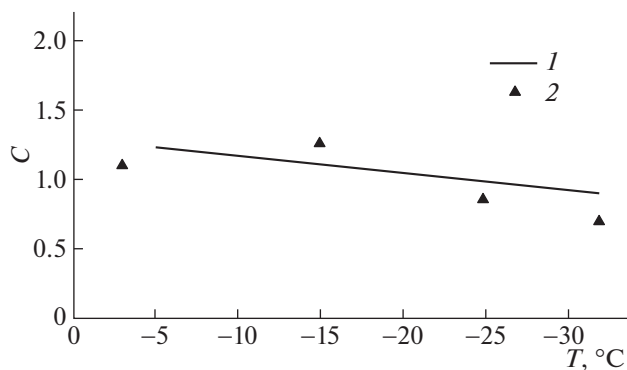


Рис. 1. Зависимость $C(T)$ для пресного льда. 1 – линия аппроксимация; 2 – экспериментальные данные.

риментов являлись: определение динамической твердости льда H [МПа], гидродинамического коэффициента сопротивления C , полного коэффициента сопротивления C_x и размеров каверн в зависимости от температуры T [°C]. Задачи решались следующими экспериментальными способами: получение диаграмм движения $h(t)$ (зависимость глубины h от времени t) с помощью бесконтактных индукционных датчиков, срабатывающих при прохождении ударником измерительных сечений “датчик-магнит” (мимо центров датчиков) и получение размеров образующихся каверн методом импульсного рентгенографирования.

По полученным экспериментальным зависимостям $h(t)$ определяли динамическую твердость H и гидродинамический коэффициент сопротивления C методом наименьших квадратов применительно к схеме движения в графической форме построения Понселе [14, 15]. В этой схеме уравнение движения выражено в следующем виде:

$$m \frac{dV}{dt} = -C \frac{\rho V^2}{2} S - HS, \quad (1)$$

где C и H – постоянные; m – масса ударника; S – площадь кавитатора ударника; ρ – плотность среды; V – текущая скорость ударника.

Проинтегрировав дважды уравнение (1), получим:

Таблица 1.

Коэффициент	Пресный лед
a , МПа °C	8000
b , °C	–41
c , МПа	181
λ	0.011
μ	1.2416
Диапазон применимости, °C	минус 32 < T < минус 3

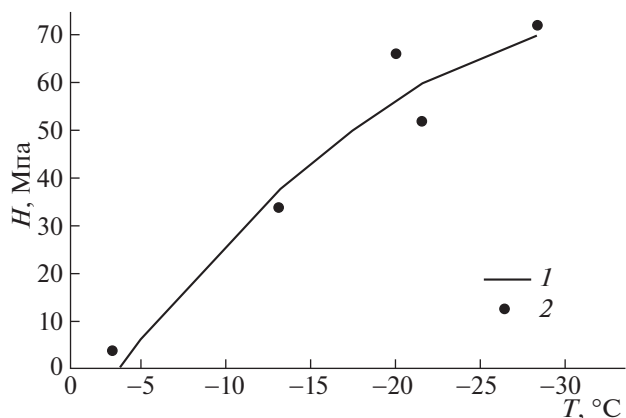


Рис. 2. Зависимость $H(T)$ для пресного льда. 1 – линия аппроксимация; 2 – экспериментальные данные.

$$h(t)_{anp} = \frac{2m}{SC\rho} \ln \left| \cos \psi t + \frac{1}{\sqrt{\phi}} \sin \psi t \right|, \quad (2)$$

$$\text{где } \psi = \frac{S}{m} \sqrt{\frac{C\rho H}{2}}, \quad \phi = \frac{2H}{C\rho V_0^2}.$$

Коэффициент полного сопротивления C_x в схеме Понселе выражен следующим образом:

$$C_x(V) = C + \frac{2H}{\rho V^2}. \quad (3)$$

В результате обработки экспериментальных данных и определения коэффициентов C , H , C_x для опыта установлено влияние температуры на эти коэффициенты.

На рис. 1 представлена зависимость $C(T)$ для пресного льда. Линия-аппроксимация экспериментальных точек методом наименьших квадратов, описывалась соотношением $C(T) = \lambda T + \mu$. Значение коэффициентов λ и μ приведены в табл. 1. Коэффициент C слабо зависит от температуры, отмечается его незначительное понижение с понижением температуры в пресном льду.

На рис. 2 приведена зависимость динамической твердости H [МПа] от температуры T [°C], функция аппроксимации (методом наименьших квадратов) экспериментальных $H(T)$ точек нанесена сплошной линией и выражена следующим образом:

$$H(T) = \frac{a}{T + b} + c. \quad (4)$$

Значение коэффициентов a , b , c приведены в табл. 1.

Динамическая твердость H существенно зависит от температуры. В области экспериментальных температур (при минус 32°С ≤ T ≤ минус 3°С) максимальное значение H равно 71 МПа. Приве-

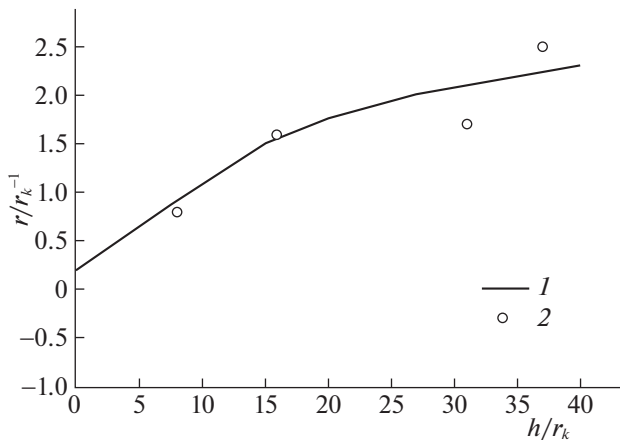


Рис. 3. Профили каверн. 1 — линия аппроксимация; 2 — экспериментальные данные.

денные в [6] значения $H = 20\text{--}35$ МПа лежат в диапазоне полученных значений.

Исходя из полученных зависимостей $C(T)$ и $H(T)$, можно построить функцию $C_x(V, T)$:

$$C_x(V, T) = \lambda T + \mu + \frac{2 \cdot 10^6 [a + c(T + b)]}{\rho V^2 (T + b)}, \quad (5)$$

где λ, μ — коэффициенты линейной аппроксимации зависимости $C(T)$. Значения коэффициентов a, b, c, λ, μ для зависимости $H(T)$ и $C(T)$ указаны в табл. 1.

На рис. 3 показаны профили каверн в опытах с пресным льдом. Линией показана аппроксимация экспериментальных каверн по методу наименьших квадратов

$$\hat{r}(\hat{h}) = 3.6 - \frac{82.5}{\hat{h} + 24.3}, \quad (6)$$

где $\hat{r} = \frac{r}{r_k} - 1$ — относительный радиус каверны;

$\hat{h} = \frac{h}{r_k}$ — относительное расстояние от переднего торца ударника до точки входа в преграду; r — радиус каверны; r_k — радиус ударника.

Установлено, что размеры образующейся каверны в пресном льду при реализованных в опытах условиях внедрения практически, с учетом погрешности измерений, не зависят от температуры. Большой разброс размеров каверн в различных опытах, не связанный с температурой льда, говорит о возможном влиянии других факторов, не учтенных в данной работе.

Таким образом, по результатам проведенных испытаний и анализа результатов установлены количественное влияние температуры льда на его прочность, коэффициент сопротивления и размер каверны.

В дальнейшем предполагается продолжить экспериментальные исследования высокоскоростного проникания ударников в пресный лед и создания математических моделей поведения льда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shulson E.M.* The structure and Mechanical Behavior of Ice *Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (JOM)*. 1999. V. 51. P. 21–27.
2. *Erland M. Schulson, Paul Duval.* Ductile behavior of polycrystalline ice: experimental data and physical processes. *Cambridge University Press*. February, 2010. P. 101–152.
3. *Гольдштейн Р.В.* Механика разрушения льда и некоторые ее приложения. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 1990. № 5. С. 81–88.
4. *Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М.* Вопросы механики разрушения льда и ледяного покрова при анализе ледовых нагрузок. *Вести газовой науки*. № 3(14). С. 104–113.
5. *Орлов М.Ю., Орлова Ю.Н.* Исследование процесса взрывного нагружения льда. *Вестник Томского государственного университета*. 2015. № 6 (38). С. 81–89.
6. *Bogomolov G.N., Glazyrin V.P., Orlov M.Y.* Research of ice destruction under dynamic loading. Part 1. Modeling explosive ice cover into account the temperature. Сборник: MATEC Web of Conferences Сер. “International Youth Scientific Conference “Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment”, HMTTSC 2017” 2017. С. 01014.
7. *Орлов М.Ю., Богомолов Г.Н.* Изучение поведения льда при ударных и взрывных нагрузках. *Полярная механика*. 2016. № 3. С. 192–202.
8. *Орлов М.Ю.* Исследование поведения толстого льда при ударном нагружении. Моделирование взаимодействия крупногабаритного ударника со льдом на водной подложке. Сборник: *Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред*. Сборник трудов 7-й всероссийской научной конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского. 2017. С. 318–320.
9. *Глазырин В.П., Орлов Ю.Н., Орлов М.Ю., Орлова Ю.Н., Богомолов Г.Н.* Экспериментально-теоретическое исследование ударно-взрывного нагружения льда. *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2013. Т. 56. № 7–3. С. 38–40.
10. *Орлов М.Ю., Орлова Ю.Н., Богомолов Г.Н.* Экспериментальное исследование процессов взрывного нагружения пресноводного льда. Сборник: *Интеллектуальные энергосистемы труды IV Международного молодежного форума: в 3 томах. Томский политехнический университет*. 2016. С. 102–105.
11. *Голубятников В.В., Орлов М.Ю.* Исследование поведения ледяного покрова при взрывном нагружении. Сборник: *Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред*. Сборник трудов 6-й Всероссийской научной

- конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского: в 2-х томах. 2016. С. 218–227.
12. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н., Садохин А.Н., Богомолов Г.Н. Комплексное теоретико-экспериментальное исследование поведения поликристаллического льда при динамических нагрузках. Часть 1. Эксперименты по ударно-взрывному нагружению пресноводного льда. Расчет процесса взрывного нагружения системы “лед-вв-вода”. *Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема*. 2013. № 2 (13). С. 98–112.
 13. Бабкин А.В., Селиванов В.В. Прикладная механика сплошных сред. Т. 1: Основы механики сплошных сред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 376 с.
 14. Велданов В.А., Даурских А.Ю., Карнейчик А.С., Максимов М.А. Возможности моделирования проникания тел в грунтовые среды. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013. Вып. 9.
 15. Велданов В.А., Исаев А.Л., Ладов С.В., Федоров С.В., Проникание твердого цилиндрического тела в сплошной и ослабленный отверстием лед. М., Оборонная техника. 2002. № 11.

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2020, vol. 9, no. 2, pp. 95–99

Study of the Penetration of a Cylindrical Striker through an Ice Barrier

S. I. Gerasimov^{a,b,c,#}, A. V. Zubankov^{a,b}, A. P. Kalmykov^a, S. A. Kapinos^a, E. G. Kosyak^b, P. G. Kuznetsov^b, and R. V. Gerasimova^b

^a Russian Federal Nuclear Center All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov, 607190 Russia

^b Sarov Physical Technical Institute, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Sarov, 607186 Russia

^c Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, 603024 Russia
#e-mail: s.i.gerasimov@mail.ru

Received October 26, 2019; revised November 6, 2019; accepted December 24, 2019

Abstract—The penetration of cylindrical strikers with a flat end through ice barriers on the normal to the front surface of the barriers. The possibility of using induction sections to fix the time strikers in the study of the penetration through a fresh ice barrier in the range of initial velocities from 800 to 1500 m/s. Diagrams of motion (depth versus time) and the size of the cavities have been experimentally obtained by pulsed radiography. According to the results of the tests and analysis of the results, the influence of the ice temperature on its strength, resistance coefficient, and the size of the cavity have been determined.

Keywords: induction section, fresh ice barrier, pulsed radiography method, cavity, dynamic hardness

DOI: 10.1134/S2304487X20020042

REFERENCES

1. Shulson, E.M. The structure and Mechanical Behavior of Ice Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (JOM), 51, 1999, p. 21–27.
2. Erland M. Schulson, Paul Duval. Ductile behavior of polycrystalline ice: experimental data and physical processes. Cambridge University Press. February, 2010. P. 101–152.
3. Gol'dshteyn R.V. Mekhanika razrusheniya l'da i nekotoryye yeye prilozheniya. Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin, 1990, № 5, pp. 81–88.
4. Gol'dshteyn R.V., Osipenko N.M. Voprosy mekhaniki razrusheniya l'da i ledyanogo pokrova pri analize ledovykh nagruzok. Vesti gazovoy nauki. № 3(14). P. 104–113.
5. Orlov M.Yu., Orlova Yu.N. Issledovaniye protsessa vzryvnogo nagruzheniya l'da. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. № 6(38). P. 81–89.
6. Bogomolov G.N., Glazyrin V.P., Orlov M.Y. Research of ice destruction under dynamic loading. Part 1. Modeling explosive ice cover into account the temperature. Сборник: МАТЕС Web of Conferences Сер. “International Youth Scientific Conference “Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment”, HMTTSC 2017” 2017. P. 01014.
7. Orlov M.Yu., Bogomolov G.N. Studying the behavior of ice under shock and explosive loads. Polar mechanics. 2016. No. 3. P. 192–202.
8. Orlov M.Yu. Investigation of the behavior of thick ice under shock loading. simulation of the interaction of a

- large projectile with ice on an aqueous substrate. Collection: Mechanics of composite materials and structures, complex and heterogeneous media. Proceedings of the 7th All-Russian Scientific Conference with international participation. I.F. Obraztsova and Yu.G. Yanovsky. 2017. P. 318–320.
9. Glazyrin V.P., Orlov Yu.N., Orlov M.Yu., Orlova Yu.N., Bogomolov G.N. Experimental and theoretical study of shock and explosive loading of ice. News of higher educational institutions. Physics. 2013. Vol. 56. No. 7–3. P. 38–40.
 10. Orlov M.Yu., Orlova Yu.N., Bogomolov G.N. An experimental study of the processes of explosive loading of freshwater ice. Collection: Intelligent Energy Systems Proceedings of the IV International Youth Forum: in 3 volumes. Tomsk Polytechnic University. 2016. P. 102–105.
 11. Golubyatnikov V.V., Orlov M.Yu. Exploring the behavior of ice cover during explosive loading. Collection: Mechanics of composite materials and structures, complex and heterogeneous media. Proceedings of the 6th All-Russian Scientific Conference with international participation. I.F. Obraztsova and Yu.G. Yanovsky: in 2 volumes. 2016. P. 218–227.
 12. Glazyrin V.P., Orlov M.Yu., Orlov Yu.N., Sadokhin A.N., Bogomolov G.N. A comprehensive theoretical and experimental study of the behavior of polycrystalline ice under dynamic loads. Part 1. Experiments on shock-explosive loading of freshwater ice. Calculation of the process of explosive loading of the ice-vv-water system. Bulletin of the Amur State University named after Sholem Aleichem. 2013. No. 2 (13). P. 98–112.
 13. Babkin A.V., Selivanov V.V. Applied mechanics of continuous media. T. 1: Fundamentals of continuum mechanics. Moscow, Publishing House of MSTU. N.E. Bauman, 2006, 376 pp.
 14. Veldanov V.A., Daursky A.Yu., Karneychik A.S., Maximov M.A. Possibilities of modeling the penetration of bodies into soil environments. Engineering Journal: Science and Innovation, 2013, no. 9.
 15. Veldanov V.A., Isaev A.L., Ladov S.V., Fedorov S.V. Penetration of a solid cylindrical body into a solid ice weakened by a hole. M., defense technology. No. 11. 2002.