

УДК 531.133.1

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ УДАРНИКА В СОЛЕНОМ ЛЬДУ

С. И. Герасимов<sup>\*,\*\*,\*\*\*,\*\*\*\*</sup>, А. В. Зубанков<sup>\*,\*\*</sup>,  
А. П. Калмыков<sup>\*</sup>, С. А. Капинос<sup>\*</sup>, Е. Г. Косяк<sup>\*\*</sup>, П. Г. Кузнецов<sup>\*\*</sup>

\* Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 607190 Саров, Россия

\*\* Саровский физико-технический институт — филиал Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”, 607186 Саров, Россия

\*\*\* Нижегородский государственный технический университет им. Р. А. Алексеева, 603950 Нижний Новгород, Россия

\*\*\*\* Институт проблем машиностроения РАН — филиал Института прикладной физики РАН, 603024 Нижний Новгород, Россия  
E-mails: s.i.gerasimov@mail.ru, alex-zub@yandex.ru, apkalm@gmail.com, kapinoss@gmail.com, egkosyak@sarfti.ru, pgk@sarfti.ru

Приводятся результаты экспериментального исследования нормального соударения цилиндрических ударников с морским льдом. Анализируется динамика развития волновых процессов в толще соленой ледяной преграды и поведение сил сопротивления прониканию ударников при различных значениях скорости соударения. Рассматривается возможность использования индукционных сечений для фиксации во времени положения ударников в преграде в диапазоне начальных значений скоростей  $800 \div 1500$  м/с. С использованием метода импульсного рентгенографирования получены диаграммы движения (зависимость глубины от времени) и размеры образующихся каверн.

Ключевые слова: поликристаллический лед, соленый лед, цилиндрический ударник, динамическая твердость, каверна.

DOI: 10.15372/PMTF20200407

Интерес к исследованию процессов ударного взаимодействия деформируемых тел и конструкций со льдом обусловлен постановкой и решением ряда прикладных технических задач (закономерности изменения контактных усилий сопротивления внедрению, определение финальной глубины внедрения и параметров разрушений в ледяной преграде).

Лед, представляющий собой модельный материал с регулируемой структурой и свойствами, используется во многих моделях механики сплошной среды. В зависимости от температуры, солености, условий нагружения упругие и реологические свойства льда различаются. Свойства льда изучались в течение многих лет, однако до сих пор его физико-механические параметры не изучены полностью, особенно при интенсивном динамическом нагружении.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 18-29-10073).

© Герасимов С. И., Зубанков А. В., Калмыков А. П., Капинос С. А., Косяк Е. Г., Кузнецов П. Г., 2020

Зависимость глубины каверны от времени движения ударника  
при различных значениях температуры

$h$ , мм	$t$ , мкс		
	$T = -31$ °С	$T = -20$ °С	$T = -10$ °С
0	0	0	0
150	211,6	195,7	183,9
250	387,3	357,1	345,3
350	660,3	575,2	564,9
450	1157,1	974,2	930,0

Большое количество работ (см., например, [1–3]) посвящено исследованию прочности и трещиностойкости морского поликристаллического льда при динамических нагрузках. Основными факторами, влияющими на прочность льда, являются температура, скорость нагружения, тип льда, структура кристаллов, размер образцов.

Лед имеет уникальные пластические свойства, квазижидкий поверхностный слой, значительную протонную проводимость, полностью разупорядоченную водородную подрешетку и т. д.

Поликристаллический лед используется в качестве модельного материала при проведении фундаментальных исследований в области механики твердого тела. Традиционным и в конечном счете определяющим с точки зрения инженерно-технических приложений является изучение физико-механических свойств льда.

В настоящей работе приведены результаты исследования пробития ледовых преград цилиндрическими ударниками с плоским торцом калибра 10,0 и 14,5 мм в диапазоне значений скорости 800 ÷ 1500 м/с (пробитие осуществлялось по нормали к лицевой поверхности преграды). Преграда изготавливалась из льда с соленостью  $s = 10$  % в климатической камере в течение приблизительно 72 ч с постепенным уменьшением температуры внутри камеры (в среднем на 5 ÷ 10 °С/сут). Соленый лед изготавливался из растворенной в горячей водопроводной воде морской соли, т. е. моделировался морской природный лед в диапазоне температур  $-32$  °С ≤  $T$  ≤  $-3$  °С.

Плотность льда принималась равной 900 кг/м<sup>3</sup> [4]. В экспериментах определялись динамическая твердость льда  $H$  (в мегапаскалях), гидродинамический коэффициент сопротивления  $C$ , полный коэффициент сопротивления  $C_x$  и размеры каверн при различных значениях  $T$  и  $s$ . Для этого использовались следующие экспериментальные способы: получение диаграмм движения  $h(t)$  (зависимость глубины каверны  $h$  от времени срабатывания датчиков  $t$ ) с помощью бесконтактных индукционных датчиков (см. таблицу), срабатывающих при прохождении ударником измерительных сечений датчик — магнит, и определение размеров образующихся каверн с помощью метода импульсного рентгенографирования.

По полученным экспериментальным зависимостям  $h(t)$  определялись динамическая твердость  $H$  и гидродинамический коэффициент сопротивления  $C$ . При этом использовался метод наименьших квадратов применительно к схеме движения в форме схемы Понселе [5], где уравнение движения имеет вид

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

( $C$ ,  $H$  — постоянные;  $m$  — масса ударника;  $S$  — площадь кавитатора ударника;  $\rho$  — плотность среды;  $V$  — текущая скорость ударника).

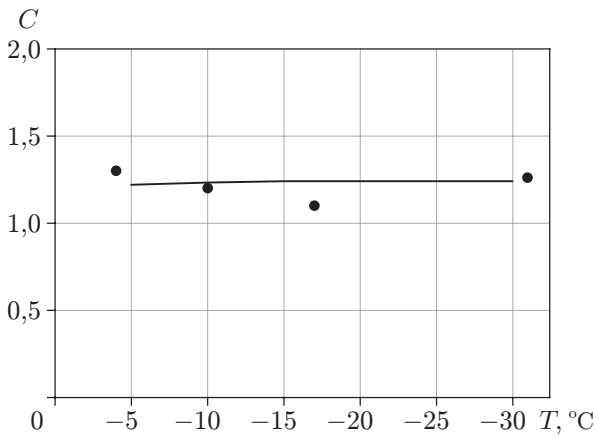


Рис. 1

Рис. 1. Зависимость гидродинамического коэффициента сопротивления от температуры для соленого льда:

точки — экспериментальные данные, линия — аппроксимация с помощью метода наименьших квадратов

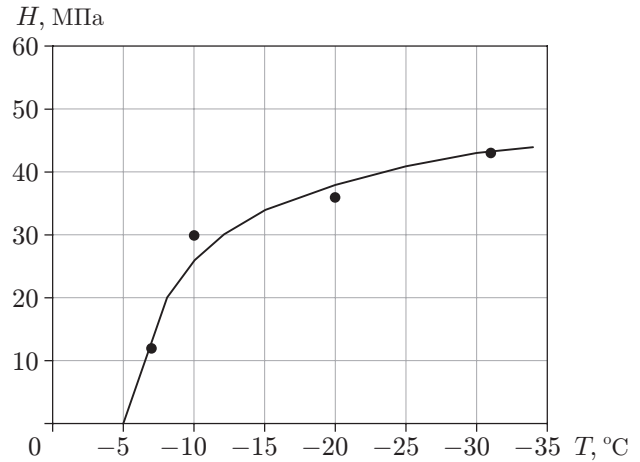


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость динамической твердости от температуры для соленого льда:

точки — экспериментальные данные, линия — аппроксимация с помощью метода наименьших квадратов

Проинтегрировав уравнение (1) два раза, получаем

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

где  $\psi = (S/m)\sqrt{C\rho H/2}$ ;  $\varphi = 2H/(C\rho V_0^2)$ . Решение имеет смысл при  $0 \leq t \leq t_k$  ( $t_k = (1/\psi) \arctg(1/\sqrt{\varphi})$ ). Коэффициент полного сопротивления  $C_x$  в схеме Понселе записывается следующим образом:

$$C_x(V) = C + 2H/(\rho V^2).$$

Результаты анализа экспериментальных данных позволили выявить зависимость коэффициентов  $C$ ,  $H$ ,  $C_x$  от температуры и солёности.

На рис. 1 представлена зависимость  $C(T)$  для соленого льда. Линия, аппроксимирующая экспериментальные точки с помощью метода наименьших квадратов, описывалась соотношением  $C(T) = \lambda T + \mu$  (коэффициенты линейной аппроксимации имеют значения  $\lambda = 0,0022$ ,  $\mu = 1,1989$ ). Видно, что коэффициент  $C$  слабо зависит от температуры и солёности льда, при уменьшении температуры он незначительно уменьшается.

На рис. 2 приведена зависимость динамической твердости  $H$  от температуры  $T$ . Функция аппроксимации экспериментальных точек имеет вид

$$H(T) = a/(T + b) + c,$$

где  $a = 260$  МПа·°С;  $b = 0$  °С;  $c = 52$  МПа. Данные значения коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$  применимы в диапазоне температур  $-31$  °С  $\leq T \leq -5$  °С.

Динамическая твердость  $H$  существенно зависит от температуры. В области указанных экспериментальных температур ( $-31$  °С  $\leq T \leq -5$  °С) максимальное значение

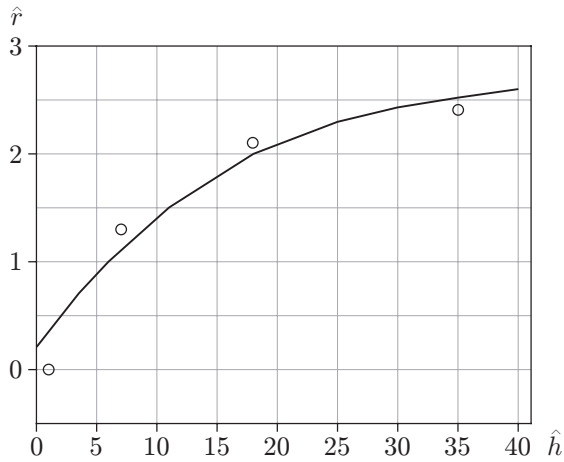


Рис. 3

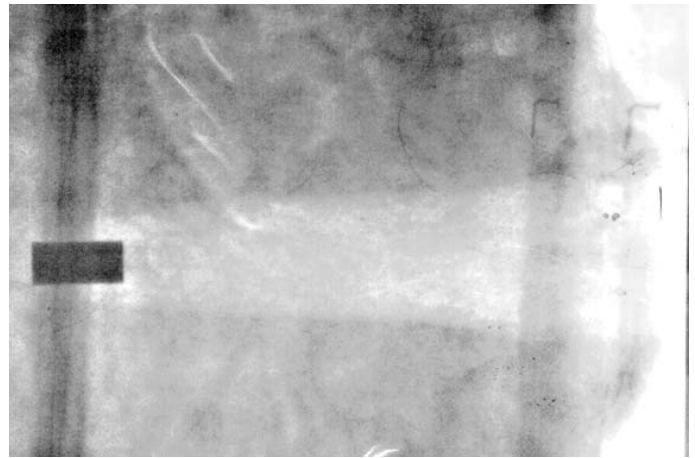


Рис. 4

Рис. 3. Профили каверн:

точки — экспериментальные данные, линия — аппроксимация с помощью метода наименьших квадратов

Рис. 4. Рентгенограмма движения ударника в соленом льду

$H = 43$  МПа, при этом в области температур плавления льда ( $-5\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) прочность близка к нулю. Приведенные в работе [6] значения  $H = 13,5$  МПа для соленого льда находятся в диапазоне полученных значений.

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

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

На рис. 3 показаны профили каверн в экспериментах с соленым льдом, на рис. 4 — рентгенограмма движения ударника в соленом льду. Линией показана аппроксимация экспериментальных данных о кавернах с помощью метода наименьших квадратов:

$$\hat{r}(\hat{h}) = 3,6 - 60,7/(\hat{h} + 18).$$

Здесь  $\hat{r} = r/r_k - 1$  — относительный радиус каверны;  $\hat{h} = h/r_k$  — относительное расстояние от переднего торца ударника до точки входа в преграду;  $r$  — радиус каверны;  $r_k$  — радиус ударника.

Установлено, что с учетом погрешности измерений размеры образующейся в соленом льду каверны при реализованных в экспериментах условиях внедрения практически не зависят от температуры. В соленом льду ширина каверны в среднем на 20 % больше, чем в пресном. Большое различие размеров каверн в различных опытах, не зависящее от температуры льда, свидетельствует о возможном влиянии других факторов, не учтенных в данной работе.

Таким образом, анализ результатов проведенных исследований позволяет сделать вывод о влиянии температуры льда на его прочность, коэффициент сопротивления и размер каверны.

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

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Weeks W.** The mechanical properties of sea ice / W. Weeks, A. Assur. Hanover: USACRREL Monogr., 1967.
2. **Цуриков В. Л.** Проблема прочности морского льда // Сев. мор. путь. 1939. Т. 16. С. 45–74.
3. **Гольдштейн Р. В.** Механика разрушения льда и некоторые ее приложения // Пробл. машиностроения и надежности машин. 1990. № 5. С. 81–88.
4. **Маэно Н.** Наука о льде. М.: Мир, 1988.
5. **Сагомоян А. Я.** Проникание. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 1974.
6. **Велданов В. А., Исаев А. Л., Ладов С. В., Федоров С. В.** Проникание твердого цилиндрического тела в сплошной и ослабленный отверстием лед // Оборон. техника. 2002. № 11. С. 46–51.

*Поступила в редакцию 26/IX 2019 г.,  
после доработки — 10/XII 2019 г.  
Принята к публикации 30/III 2020 г.*

---