

УДК. 551.467: 539.4

ВЛИЯНИЕ «ОТЖИГА» НА УДЕЛЬНУЮ ЭНЕРГИЮ РАЗРУШЕНИЯ ПОСЛОЙНО НАМОРОЖЕННОГО ЛЬДА

© 2024 г. В.А. Джуманджи, А.В. Шавлов*, И.В. Соколов, Е.С. Яковенко

Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН, Тюмень, Россия

**e-mail: shavlov@ikz.ru*

Поступила 15.02.2024 г.

После доработки 14.05.2024 г.

Принята к печати 08.07.2024 г.

Методом ударного разрушения исследована удельная объёмная энергия разрушения льда, приготовленного из дистиллированной воды. Установлено влияние отжига (выдержки льда при температуре близкой к точке плавления) на данную характеристику. Показано, что пятичасовой отжиг при температуре -1.5°C приводит к уменьшению объёма разрушения и упрочнению льда, а отжиг при температуре около 0°C — к увеличению объёма разрушения и снижению прочности.

Ключевые слова: лёд, кристаллизация, отжиг, прочность, удельная энергия разрушения

DOI: 10.31857/S2076673424030115, **EDN:** INGMWT

ВВЕДЕНИЕ

Промышленное освоение северных и восточных регионов страны способствует развитию и распространению технологий использования льда в качестве строительного материала (Petrov, 2019; Гриневич и др., 2020; Orlov, Orlova, 2022). Накоплен значительный опыт в использовании льда при строительстве временных дорог и переправ (Бернштейн, 1935; Умеренное намораживание..., 1982), плотин и дамб (Вдовин, Краснов, 1986; Даниэлян и др., 1986). Лёд применяют для возведения искусственных островов с целью размещения на них оборудования (Войтковский и др., 1982; Край, 1983; Савельев, Латалин, 1986), успешно используют для теплоизоляции и поддержания низких температур в хранилищах (Бернал, 1966). Лёд успешно применяют в спорте при создании горнолыжных трасс с искусственным снежным покрытием (<https://welcome.mosreg.ru/stories/gornolyznye-kurorty-podmoskov-a-kuda-otpravitsa-etoj-zimoj>) и конькобежных треков (Tusima et al., 1998).

В большинстве практических применений строительный лёд должен иметь хорошую несущую способность, которая может быть обеспечена его высокой прочностью. Для повышения прочности в лёд добавляют армирующие добавки, способные принимать на себя часть механической нагрузки. Такими материалами могут быть древесная стружка (Perutz, 1948), водоросли (Дунаев,

1957), целлюлоза (Рыженков, 2015; Li, 2015), полимерные волокна (<https://ndn.info/novosti/29327-armirovannyj-led-dlya-strojki-mostov-izobreli-v-sibiri>) и т.д. Лёд с армирующими добавками называют льдокомпозитным материалом. Прочность льдокомпозитных материалов может в несколько раз превышать прочность чистого льда. Существует также термомеханический (не композитный) путь воздействия на механические свойства. Он заключается в применении ко льду методов, используемых в металлообработке, таких как термическая обработка (например, «отжиг», подразумевающий выдержку льда при температуре близкой к точке плавления) и термомеханическая обработка («отжиг» в присутствии нагрузки). В работе (Tatibouet et al., 1975) отжиг льда использовался для изменения его дислокационной структуры, вследствие которого изменялись ультразвуковые свойства льда. В работах (Шавлов, 1996; Шавлов и др., 2007) отжиг использовался для уменьшения скорости деформации льда. Авторы отмечали также влияние отжига на прочность, упругость, коэффициент трения льда. Детальной информации по влиянию отжига на механические характеристики льда мало. Поэтому необходимы дальнейшие исследования в данной области знаний для выяснения перспектив применения методов термомеханической обработки с целью увеличения прочности льда, а также упрочнения льдокомпозитных материалов.

Цель работы состоит в продолжении проведённых на ледовом стадионе в Крылатском (Москва)

(Шавлов и др., 2007) исследований влияния термо-механической обработки льда на его механические характеристики. Предполагается экспериментально исследовать влияние отжига (при различных температуре и длительности отжига) на прочностную характеристику льда — такую как удельная энергия разрушения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Методика ударного разрушения. Прочность твёрдых материалов традиционно определяют тестовыми испытаниями кубических образцов на медленное сжатие (с постоянной скоростью) или образцов в виде пластин на растяжение до их разрушения (Богородский, Гаврило, 1980). Такие испытания трудоёмки и требуют больших затрат времени. Наряду с традиционными испытаниями прочность часто испытывают методом ударного разрушения, который заключается в измерении глубины внедрения ударного инструмента в исследуемый материал, в частности, в лёд (Reichmus, 1963; Зеленин, 1968; Лихоманов и др., 1971; Хейсин и др., 1973; Спивак, Попов, 1975; Елифанов, 1985; Цуприк, 2013). Поскольку скорость деформирования материала при традиционном и ударном испытаниях различна, то различаются и полученные данными методами значения прочности. Прочность при ударном разрушении, как правило, ниже. Но, в целом, между результатами, полученными этими методами, наблюдается устойчивая корреляция. Исследователи выбирают метод ударного разрушения из-за простоты проведения экспериментов, отсутствия необходимости приготовления образцов стандартной формы, из-за возможности выполнения множества опытов на одном образце, из-за простоты изменения массы и скорости ударника в опытах, из-за малых затрат времени и труда на получение одной экспериментальной точки. В экспериментах со льдом в качестве ударника обычно используют стальной шар. Его сбрасывают на поверхность льда с фиксированной высоты. После соударения на поверхности льда остаётся лунка раздробленного льда. Часть раздробленного льда оказывается вытесненной из лунки, и образует небольшой бортик по периметру лунки. В эксперименте определяют диаметр лунки d (рис. 1), вычисляют объём разрушенного льда V_D (при не слишком большой силе удара этот объём равен объёму лунки V) и определяют удельную объёмную энергию разрушения льда μ_V по формуле

$$\epsilon_V = W / V_D, \quad (1)$$

где $W = mgH$ — потенциальная энергия шара, израсходованная на разрушение; m — масса шара; g — ускорение свободного падения; H — высота

падения шара; $V = \frac{\pi h}{6} \left(h^2 + \frac{3}{4} d^2 \right)$ — объём лунки (объём шарового сегмента), $h = R - \sqrt{R^2 - \frac{1}{4} d^2}$ — глубина лунки, R — радиус шара. Очевидно, что чем выше прочность материала, тем больше удельная энергия разрушения.

В настоящей работе в качестве ударного инструмента использовали стальной шар радиусом $R = 15$ мм, массой $m = 110$ г. Шар падал по почти вертикальному желобу (угол наклона к горизонтали 85°). Высота падения составляла $H = 1$ м. Шар при падении проскальзывал по желобу, не раскручиваясь. Контейнер с образцом льда плотно прилегал к поверхности лабораторного стола, и при ударах шаром не обнаруживал заметных колебаний. На рис. 1, а приведена фотография лунки, оставленная шаром на поверхности льда. После удара шар отскакивал от лунки и вторично касался поверхности рядом с ней. Высота упругого отскока шара от лунки составляла 1–2 мм, что составляет 0.1–0.2% от высоты падения шара. Следовательно, более 99% потенциальной энергии шара расходовалось на пластическую деформацию и разрушение льда. Шар перед испытаниями охлаждали до температуры льда.

Объект исследования. Лёд приготавливали методом послойного намораживания до толщины около 4 см. Сначала в металлический контейнер размерами $280 \times 230 \times 60$ мм³ наливали слой дистиллированной воды толщиной 2 см с температурой 25°C , затем контейнер закрывали крышкой, ставили в морозильную камеру «Бирюса 14» и замораживали в течение нескольких часов до температуры -18°C . Далее, вынимали контейнер из камеры, нагревали на воздухе до температуры льда -4°C , затем наливали второй слой воды толщиной 1 см и снова замораживали (подогрев льда был необходим для того, чтобы лёд не растрескивался при наливании воды). Третий слой воды толщиной 1 см замораживали так же, как второй. Получающийся лёд был поликристаллическим, так как никаких специальных мер, направленных на формирование монокристаллического льда, не предпринимали. Предположительно, размер кристаллических зёрен льда не превышал нескольких долей миллиметра, поскольку, как будет показано ниже, размер осколков льда при разрушении составлял около 0.5 мм. Кроме того, лёд содержал множество мелких воздушных пузырьков с концентрацией до 10 см^{-3} , размером в доли миллиметра, видимых невооружённым глазом.

Температуру льда измеряли цифровым термометром «ОТ-НОМ10», датчик которого был в заморожен в центре ледяного образца. Абсолютная погрешность термометра составляла $\pm 1^\circ\text{C}$.

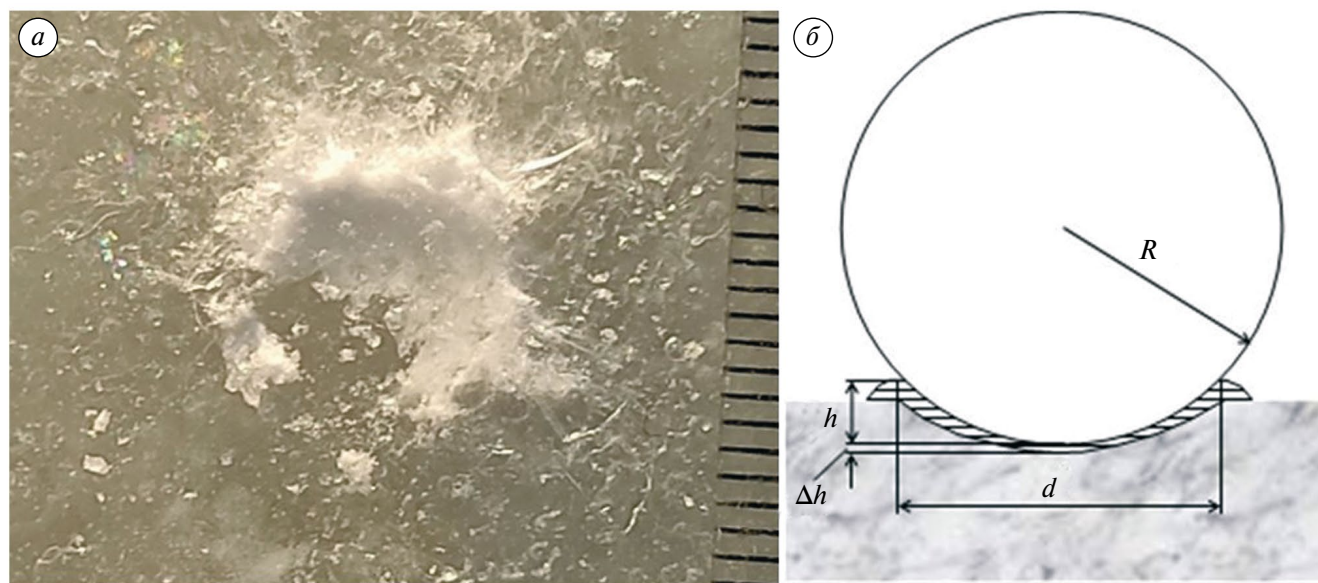


Рис. 1. Фотография лунки на фоне линейки с ценой деления 1 мм (а) и схема измерения параметров лунки (б): R – радиус шара, d – диаметр лунки, h – глубина лунки, Δh – толщина слоя разрушенного льда под дном лунки. Раздробленный лёд показан на схеме штриховкой

Fig 1. Photograph of the hole against the background of a ruler with a division value of 1 mm (a) and a diagram for measuring the parameters of the hole (b): R – is the radius of the ball, d – is the diameter of the hole, h – is the depth of the hole, Δh – is the thickness of the layer of destroyed ice under the bottom of the hole. Crushed ice is shown in the diagram by shading

Методика испытаний. Методика испытаний заключалась в следующем. Контейнер вынимали из морозильной камеры, нагревали на воздухе до температуры льда -12°C , снимали крышку с контейнера и выполняли около 10 бросков шара на поверхность льда. Броски выполняли таким образом, чтобы лунки разрушенного льда располагались на расстоянии 3–4 см друг от друга и от краёв контейнера для того, чтобы снизить влияние напряжённых областей льда под лунками и по линии контакта льда с материалом контейнера на результаты измерений. За время совершения 10 бросков (около одной минуты) лёд нагревался от -12 до -11°C за счёт теплообмена с воздухом и опорой контейнера. Лунки фотографировали камерой на фоне метрической линейки с ценой деления 1 мм. Затем контейнер со льдом закрывали крышкой и, в зависимости от задачи исследования, помещали в морозильную камеру для охлаждения льда или выполняли отжиг льда.

Для фотографирования лунок использовали камеру устройства «Redmi Note 9 Pro, Xiaomi» с разрешением 3472×4640 пиксель, в направлении, перпендикулярном поверхности льда. По фотографиям определяли диаметр лунок в пикселях с помощью инструмента Webbers ScopePhoto. Далее, пиксели пересчитывали в миллиметры.

Относительная погрешность определения диаметра была менее 10%.

Методика отжига. Отжиг льда выполняли при одной из двух температур: -1.5 или 0°C . Перед отжигом контейнер с образцом подогревали в течение около 1 часа на воздухе до температуры льда, близкой к температуре отжига, затем помещали в термостат «SB35C61WAW5-R134a» (с терморегулятором «ХН-W3001») с заданной температурой отжига и выдерживали образец от часа до нескольких суток. Далее контейнер с образцом перемещали в морозильную камеру и охлаждали, примерно в течение одного часа, для проведения последующих испытаний ударом. После испытания образец могли снова помещать в термостат на более длительный отжиг. При этом вычисляли суммарное время всех отжигов, которым подвергали образец. Полагали, что в процессе нагревания льда до температуры отжига и в процессе последующего охлаждения льда до температуры испытаний (-12°C) градиенты температуры в образце были невелики (изотермическое нагревание и охлаждение), не приводили к заметному накоплению микротрещин и не влияли на результаты измерений. Это подтверждается в описанных ниже экспериментах уверенным трендом диаметра лунок при изменении длительности отжига.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ниже представлены результаты измерений диаметров лунок в зависимости от времени хранения образца льда при температуре -18°C , диаметров лунок в зависимости от температуры проведения испытаний прочности, диаметров лунок от толщины верхнего слоя льда при послойном намораживании, диаметров лунок от времени отжига при температурах отжига -1.5 и 0°C .

В табл. 1 представлены результаты измерения диаметров лунок разрушенного льда, полученных в различные моменты времени после его приготовления и хранения при температуре -18°C . (Диаметр лунки служит показателем объёма разрушения). Испытания ударом проводили при температуре -12°C . Видно, что в течение длительного времени (4 суток) среднее значение диаметра лунки практически не изменяется (отклонение среднего значения меньше среднеквадратичной ошибки измерения). Таким образом, при температуре хранения -18°C релаксация прочности льда не наблюдается в течение длительного времени. Эти данные важны, так как в процессе проведения опытов с образцом иногда требовалось его длительное хранение в неизменном физическом состоянии.

На рис. 2 изображена зависимость диаметров лунок от значений температуры льда, при которой его испытывали. Среднее значение диаметра лунки растёт с увеличением температуры, при этом рост значительно превышает среднеквадратичную ошибку. То есть, объём разрушенного льда также растёт и, следовательно, прочность уменьшается.

Таблица 1. Диаметры лунок, полученных в различные моменты времени после приготовления льда и хранения при температуре -18°C

Table 1. Diameters of the holes obtained at various times after preparing ice and storing at -18°C

Свежеприготовленный лёд			Лёд после 4 суток хранения при -18°C		
№	d , мм	d , мм (среднее)	№	d , мм	d , мм (среднее)
1	9.8	9.64	1	9.9	9.67
2	9.4		2	9.6	
3	9.1		3	9.3	
4	9.4		4	10.4	
5	9.8		5	9.2	
6	9.9		6	9.6	
7	10.2				

Это типичное поведение прочности льда с ростом температуры (Богородский, Гаврило, 1980).

Прочность льда должна зависеть от скорости кристаллизации, а значит и от толщины верхнего слоя льда при послойном намораживании при неизменной скорости отвода тепла от образца. На рис. 3 показана зависимость диаметров лунок разрушенного льда от толщины верхнего слоя при температуре испытаний льда -12°C . С ростом толщины слоя диаметр лунок увеличивается. Отметим, что во всех опытах, отражённых на данном рисунке, толщина верхнего слоя льда (> 1 мм) превышала глубину лунки (~ 0.5 мм).

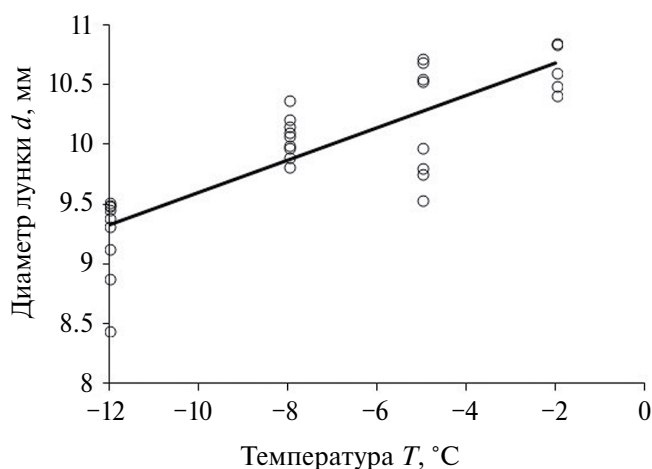


Рис. 2. Зависимость диаметров лунок d от значений температуры льда T

Fig 2. Dependence of hole diameters d on ice temperature T

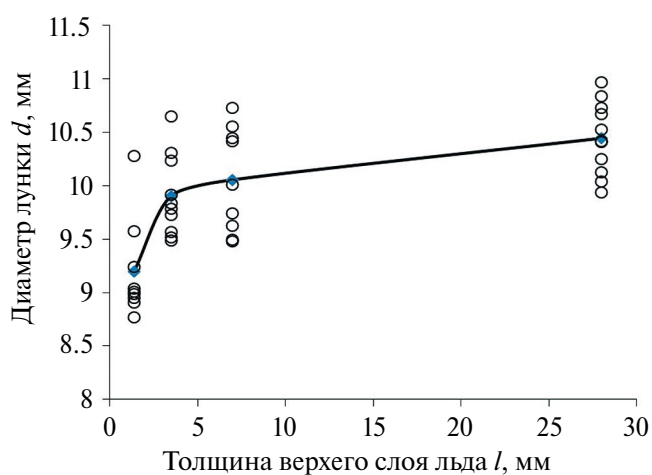


Рис. 3. Зависимость диаметров лунок льда d от толщины верхнего слоя l . Температура испытаний льда -12°C

Fig 3. Dependence of the diameters of ice holes d on the thickness of the top layer l . Ice test temperature -12°C

Влияние отжига льда на результаты испытаний демонстрирует рис. 4. Температура испытаний -12°C . На рис. 4, а отжиг выполняли при температуре -1.5°C . С увеличением времени отжига (одного и того же образца), в интервале 1–48 часов, диаметр лунки уменьшается примерно на 20%. Подобные испытания были проведены ещё на двух образцах, приготовленных по такой же технологии при температуре отжига -1.5°C . Данные для разных образцов совпали друг с другом с точностью около 10%, и все образцы демонстрировали уменьшение объёма разрушения и, следовательно, увеличение прочности с ростом времени отжига. Наиболее быстрое уменьшение диаметра лунки наблюдалось в интервале времен отжига 0–5 часов. То есть, 5 часов – это время релаксации прочности льда при температуре -1.5°C .

Температура отжига влияет на время релаксации прочности. На рис. 4, б представлена зависимость диаметров лунок от времени отжига образца при более высокой температуре, вблизи точки 0°C . (Отмечено, что в течение отжига небольшая часть льда успевала расплавиться. По окончании отжига появившуюся воду выливали из контейнера, затем образец охлаждали для проведения испытаний). Среднее значение диаметра лунки (при температуре испытаний -12°C) проявляло сложное поведение. Сначала по мере отжига диаметр мог немного увеличиваться, затем уменьшаться и вновь увеличиваться на 20%. Уменьшение и увеличение происходят за 1–2 часа каждое. То есть, время релаксации снизилось в разы по сравнению

с образцами при температуре отжига -1.5°C . Подобному испытанию подвергли ещё четыре образца, полученные по аналогичной технологии и при температуре отжига 0°C . Все образцы обнаружили минимум среднего диаметра лунки при увеличении времени отжига, затем его рост на 10–20%. Таким образом, прочность льда падает с ростом времени отжига при 0°C .

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ниже представлены простые математические соотношения, устанавливающие связь диаметра лунки с удельной объёмной энергией разрушения льда, приведено экспериментальное обоснование равенства объёма разрушенного льда и объёма лунки, вычислена величина удельной энергии разрушения, дано качественное объяснение полученных выше результатов, приведено экспериментальное подтверждение увеличения размера осколков льда по мере отжига при 0°C .

Получены простые математические выражения, устанавливающие связь между энергией разрушения и характеристиками материала. Выражения будут полезны при интерпретации экспериментальных данных.

Будем считать, что потенциальная энергия W ударяющего инструмента – шара полностью расходуется на разрушение льда, то есть на создание трещин и появление осколков. Поверхностная энергия образования трещины μ_s включает в себя разрыв межмолекулярных связей и пластическую

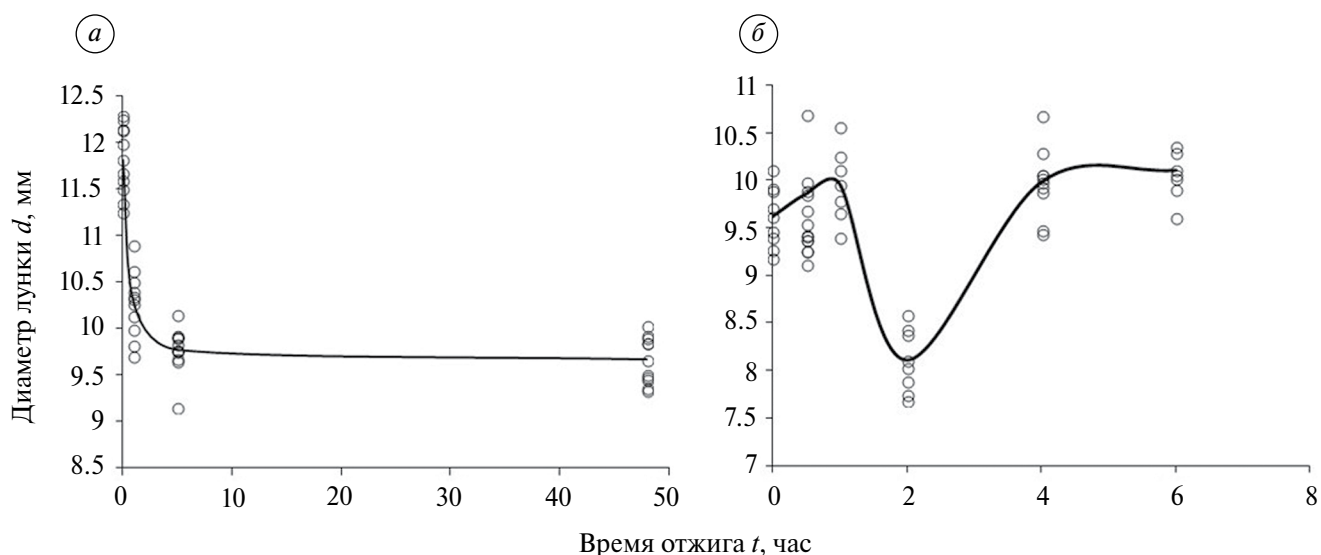


Рис. 4. Зависимость диаметра лунок d от времени отжига t . Температура отжига -1.5°C (а), 0°C (б). Температура проведения испытаний -12°C

Fig. 4. Dependence of the diameter of the holes d on the annealing time t . Annealing temperature -1.5°C (а), 0°C (б). Test temperature -12°C

деформацию среды, сопровождающую движение трещины. Энергию удара можно представить в виде

$$W = \varepsilon_S (3a^2) \left(\frac{V_D}{a^3} \right) = 3V_D \frac{\varepsilon_S}{a}, \quad (2)$$

где $3a^2$ — площадь поверхности одного осколка со средним размером a (коэффициент 3 вместо 6 использован потому, что в поверхностную энергию трещины включены энергии её левого и правого бортов), $\frac{V_D}{a^3}$ — количество осколков в разрушенном объеме V_D .

Объем разрушения представим в виде суммы объема лунки и объема разрушенного, льда под дном лунки (в приближении $h, d \ll 2R$)

$$V_D = V + \frac{\pi d^2}{4} \cdot h = \frac{\pi d^4}{64R} \left(1 + \frac{16R}{d^2} \cdot h \right), \quad (3)$$

где Δh — толщина разрушенного льда под дном лунки. Из (3) и (2) получим

$$d^4 \left(1 + \frac{16R}{d^2} \cdot h \right) = 6.8WR \frac{a}{\varepsilon_S} \quad (4)$$

Из (4) следует, что диаметр лунки пропорционален корню четвертой либо второй степени из величины $\left(WR \frac{a}{\varepsilon_S} \right)$ в зависимости от того, совпадает ли объем разрушенного льда с объемом лунки или значительно превышает его, соответственно. Ниже будет показано, что в наших опытах работает закон корня четвертой степени, то есть объем разрушенного льда равен объему лунки.

Согласно (2) и (1), объемная плотность энергии разрушения связана простым соотношением с энергией образования единицы площади поверхности трещины:

$$\varepsilon_V = \frac{3\varepsilon_S}{a}. \quad (5)$$

Найдём связь предела прочности σ с величиной ε_V . После удара шара о поверхность льда шар останавливается в тот момент, когда нагрузка шара на лёд в точности равна пределу прочности. То есть,

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\text{сила}}{\text{площадь}} = \frac{mb}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4m}{\pi d^2} \frac{v^2}{2h} = \\ &= \frac{4W}{\pi d^2 h} = \frac{4W}{\pi} \frac{8R}{d^4} = \frac{\varepsilon_V}{2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $b = \frac{v^2}{2h}$ — ускорение торможения шара, v — скорость шара в момент соприкосновения с поверхностью льда. При выводе формулы (6) учли, что

потенциальная энергия шара полностью превращается в кинетическую $W = mgH = \frac{mv^2}{2}$, а так-

же предположили, что объем разрушения равен объёму лунки. Итак, согласно формуле (6), предел прочности льда при ударном разрушении с точностью до численного коэффициента совпадает с удельной объемной энергией разрушения.

Воспользуемся полученной формулой (4) и покажем, что диаметр лунки пропорционален корню четвертой степени из величины энергии удара W или высоты падения шара H . На рис. 5 изображена экспериментальная зависимость биквадратов диаметров лунок d^4 от высоты падения шара H при температуре испытаний льда -12°C . Экспериментальные точки хорошо аппроксимируются прямой

линией с наклоном $\frac{d^4}{H} = 8.78 \times 10^{-9} \text{ м}^3$. Таким об-

разом, можно считать экспериментально установленным то, что объем разрушенного льда в опытах практически равен объёму лунки. Этот вывод подтверждается фотографией лунки льда (см. рис. 1, а), на которой часть слоя разрушенного льда отслоилась от дна лунки и выпала наружу. Толщина этого слоя не превышает нескольких долей миллиметра. В соответствии с формулой (4), эта толщина Δh должна быть меньше 0.4 мм. Именно тогда будет справедлива пропорциональная зависимость d от $H^{1/4}$.

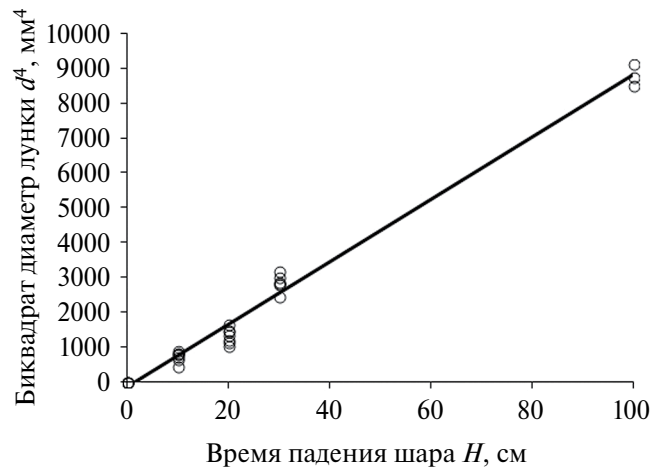


Рис. 5. Зависимость биквадратов диаметров лунок d^4 от высоты падения шара H при температуре испытаний льда -12°C

Fig. 5. Dependence of the biquadratic diameters of the holes d^4 on the height of the fall of the ball H at an ice testing temperature of -12°C

С помощью формулы (4) и найденного из опыта наклона прямой, см. рис. 5, можно определить величину $\frac{a}{\epsilon_S}$. Получим $\frac{a}{\epsilon_S} = 8 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{Дж}$. Отсюда можно определить величину ϵ_S . Она равна $\epsilon_S = 3 \text{ кДж/м}^2$ при $a = 0.3 \text{ мм}$ (см. ниже информацию о значениях a). Удельная объёмная энергия разрушения равна $\epsilon_V = 3.75 \times 10^7 \text{ Дж/м}^3$. Отсюда, ударная прочность льда, согласно (5) и (6), имеет значение $\sigma = 1.9 \times 10^7 \text{ Па}$. Полученное значение прочности близко к значениям прочности, измеренным методом ударного разрушения в работе (Шавлов и др., 2007).

Используем формулу (4) для интерпретации изложенных выше экспериментальных данных.

Увеличение диаметров лунок с увеличением температуры льда (см. рис. 2) при неизменных значениях R и W может осуществляться за счёт увеличения величины $\frac{a}{\epsilon_S}$, согласно (4). Так как пластичность льда увеличивается с ростом температуры (Богородский, 1980), то величина удельной поверхностной энергии образования трещины ϵ_S должна расти. Поэтому для того, чтобы размер лунки увеличивался с температурой, необходимо, чтобы размер осколков a увеличивался быстрее, чем величина ϵ_S . По-видимому, это возможно вследствие того, что из-за увеличения ϵ_S при повышении температуры уменьшается количество микротрещин, способных к росту (Irwin, 1968; Штремель, 1997). В результате, размер осколков будет увеличиваться.

Увеличение диаметра лунок с увеличением толщины верхнего слоя льда при послойном намораживании (см. рис. 3) можно объяснить тем, что чем больше толщина слоя льда, тем ниже скорость его кристаллизации (при фиксированной скорости отвода тепла), тем меньше в нём содержится дислокаций и микротрещин и тем больше размер осколков, на которые разрушается лёд. При этом, величина ϵ_S , предположительно, не зависит от толщины слоя льда при послойном намораживании.

Обсудим далее влияние отжига на диаметр лунок. При температуре отжига -1.5°C диаметр лунок уменьшается с увеличением времени отжига, см. рис. 4, а. Отжиг льда, как было показано в работе (Шавлов, 1996), приводит к снижению пластичности льда. Поэтому при увеличении времени отжига величина ϵ_S уменьшается из-за снижения вклада пластической деформации в данную величину. С уменьшением ϵ_S большее количество микротрещин может начать рост под действием нагрузки, поэтому размер a осколков будет уменьшаться при увеличении времени отжига. Темп снижения размера a должен опережать темп

снижения ϵ_S . Тогда диаметр лунок будет уменьшаться с отжигом, а прочность льда увеличиваться. При уменьшении диаметра лунок на 20% прочность увеличивается на 80%.

При температуре отжига вблизи точки плавления, 0°C , диаметр лунок проходит через минимум и затем увеличивается на 10–20% по мере увеличения времени отжига, (см. рис. 4, б). Рост диаметров лунок при больших длительностях отжига можно объяснить тем, что при температуре вблизи точки плавления, по-видимому, становятся существенными процессы рекристаллизации льда. Процессы рекристаллизации, по-видимому, неизбежны, так как лёд при отжиге подплавлялся. Эти процессы могли приводить к «залечиванию» решётки льда, снижению плотности дислокаций и микротрещин и, в результате, к увеличению размера осколков a льда. Поэтому диаметр лунок увеличивался. Снижение ϵ_S по мере отжига льда также способствует увеличению диаметра лунок. Увеличение диаметров лунок обусловлено снижением прочности льда.

Увеличение размера осколков по мере отжига льда при 0°C подтверждает график экспериментальной зависимости распределения осколков льда по размерам (рис. 6), полученный при длительностях отжига 2 (кривая 1) и 6 часов (кривая 2) для образца (см. рис. 4, б). При этом средний диаметр лунок увеличивается от 8 до 10 мм, а характерный размер осколков — от 0.24 до 0.58 мм, соответственно. Кривые 1 и 2 (см. рис. 6), были получены путем подсчёта количества dN осколков,

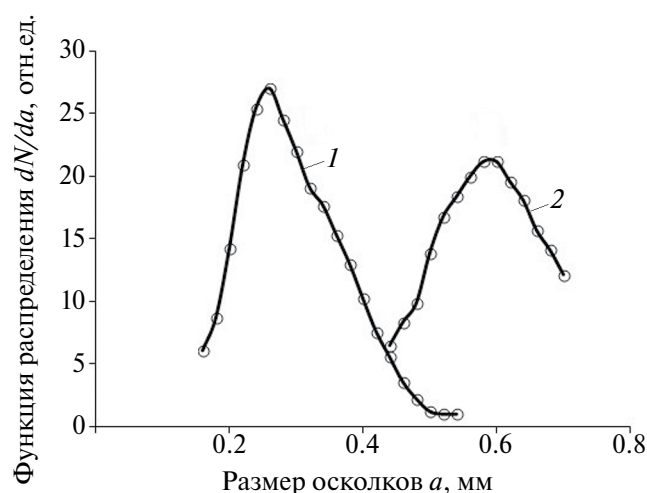


Рис. 6. Функция распределения осколков льда dN/da по размерам a . (1) — при среднем диаметре лунок 8 мм после 2-часового отжига, (2) — 10 мм после 6-часового отжига

Fig 6. Distribution function of ice fragments dN/da by size a . (1) — with an average hole diameter of 8 mm after 2-hour annealing, (2) — 10 mm after 6-hour annealing

попадающих в интервал размеров $[a, a+\Delta a]$, (полагали $\Delta a = 0.02$ мм), и двухкратным плавающим усреднением по трём точкам. Измерениям размеров подвергались осколки льда, выброшенные из лунок во время ударов шаром. Относительная погрешность измерений не превышала 10%.

По всей вероятности, размер осколков по порядку величины совпадает с размером монокристаллических зёрен использованного в опытах льда. Исследование структурно-текстурных особенностей льда и корреляции размеров монокристаллических зёрен с размерами осколков ударного разрушения льда — тема будущих исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была реализована экспериментальная методика ударного разрушения льда для изучения его удельной энергии разрушения и прочности при различных условиях отжига. Лёд получали путём послойного замораживания слоёв дистиллированной воды. Лёд имел поликристаллическую структуру с размером зерна в несколько долей миллиметра, судя по его способности разрушаться на субмиллиметровые осколки под действием ударной нагрузки. Было показано, что образцы льда можно длительное время (в течение нескольких суток) хранить при температуре -18°C без изменения физических характеристик. Отжиг льда свыше 5 часов при температуре -1.5°C приводил к уменьшению диаметра лунок от ударов шара на 20% и увеличению прочности льда на 80%. Многочасовой отжиг при температуре около 0°C приводил к противоположным результатам: диаметр лунок увеличивался на 10–20%, а прочность снижалась. Увеличение прочности льда при температуре отжига -1.5°C было объяснено уменьшением удельной поверхностной энергии образования трещин и уменьшением размера осколков, на которые разрушается лёд. Снижение прочности при температуре отжига 0°C объяснено процессами рекристаллизации льда, вследствие которых снижается плотность микротрещин в решётке льда и увеличивается размер осколков. Увеличение размеров осколков при отжиге при 0°C подтверждено экспериментально. Таким образом, отжиг способен заметно влиять на прочность. Для упрочнения льда температура отжига должна быть высокой, но не слишком близкой к точке плавления для того, чтобы исключить рекристаллизацию, влекущую разупрочнение материала, например, около -1°C .

Резюмируем, что термообработка является перспективным методом увеличения прочности льда. Очевидны перспективы возможного применения отжига для упрочнения морского льда и льдокомполитных материалов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках госзадания FWRZ-2021-0007.

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of state assignment FWRZ-2021-0007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бернал Дж.* Заключительные замечания. Механические свойства новых материалов. М.: Мир, 1966. С. 241–254.
- Бернштейн С.А.* К расчёту прочности ледяного слоя на переправе // Вест. Военно-инженерной академии. 1935. № 8. 3 с.
- Богородский В.В., Гаврило В.П.* Лёд. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 384 с.
- Вдовин Ю.И., Краснов Ю.Н.* Опыт создания ледовых плотин. Проблемы инженерной гляциологии. Новосибирск: Наука, 1986. С. 177–183.
- Войтковский К.Ф., Каменский Р.М., Константинов И.П.* Создание ледовых массивов из морской воды на мелководье Арктических морей / Тезисы докладов науч.-технич. совещания «Проблемы применения ледовых сооружений на Тюменском Севере». Тюмень, 1982. С. 9–10.
- Гриневич Д.В., Бузник В.М., Нужный Г.А.* Обзор применения численных методов для моделирования деформации и разрушения льда. Тр. Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов. 2020. № 8 (90). С. 109–122.
- Даниэлян Ю.С., Долгих Г.М., Майер В.Р.* Проект Ямбургской экспериментальной дамбы (с ледяным ядром в её теле). Проблемы инженерной гляциологии. Новосибирск: Наука, 1986. С. 183–189.
- Дунаев Е.С.* Лёд из морской воды — как строительный материал. Тр. Дальневосточного политехнич. ин-та. 1957. Т. 46. С. 1–26.
- Епифанов В.П.* Разрушение льда при ударных взаимодействиях // Докл. АН СССР. 1985. Т. 284. № 3. С. 599–603.
- Зеленин А.Н.* Основы разрушения грунтов механическими способами. М.: Машиностроение, 1968. 376 с.
- Край П.* Влияние ширины конструкции на проектные ледовые нагрузки. Физика и механика льда. М.: Мир, 1983. С. 165–179.
- Лихоманов В.А., Хейсин Д.Е.* Экспериментальное исследование удара твердого тела о лед // Проблемы Арктики и Антарктики. 1971. Вып. 38. С. 105–111.
- Савельев Б.А., Латалин Д.А.* Искусственные ледяные платформы. М.: ВИНТИ, 1986. 193 с.
- Спивак А.И., Попов А.Н.* Механика горных пород. М.: Недра, 1975. 200 с.
- Рыженков А.В.* Пайкерит и райзерит — необычные материалы для холодного климата // Природа и климат. 2015. № 3 (16). С. 29–33.

- Умеренное намораживание льда методом дальне-струйного дождевания. Якутск: Изд-во Госуниверситета, 1982. 755 с.
- Хейсин Д.Е., Лихоманов В.А. Экспериментальное определение удельной энергии механического дробления льда при ударе // Проблемы Арктики и Антарктики. 1973. № 41. С. 55–61.
- Цуприк В.Г. О циклическом характере процесса разрушения морского льда при его ударном испытании жесткой сферой. Проблемы освоения георесурсов Дальнего Востока. М.: «Горная книга», 2013. С. 26–40.
- Шавлов А.В. Лёд при структурных превращениях. Новосибирск: Наука, 1996. 182 с.
- Шавлов А.В., Рябцева А.А., Шавлова В.А. «Сверхскользкий» лёд для конькобежного спорта // Криосфера Земли. 2007. Т. 10. № 2. С. 49–59.
- Штремель М.А. Разрушение // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 4. С. 91–98.
- Irwin G.R. Engineering fracture Mechanics. V. 1. Pergamon Press, 1968. P. 241–257.
- Li, Jia Hui; Wei, Zhen; Wu, Chao. Preparation and properties of novel building materials at low temperature // Materials & Design. 2015. V. 67. P. 464–468.
- Orlov M.Y., Orlova Y.N. Phenomenological model and numerical method. In: Combined theoretical and experimental study of ice behavior under shock and explosive loads. Springer Briefs in Applied Sciences and Technology. Springer, Cham. 2022.
- Petrov I.B. Problems of modeling natural and anthropogenic Processes in the Arctic Zone of the Russian Federation // Mathematical models and computer simulations. 2019. V. 11. № 2. P. 226–246.
- Perutz M.F. A description of the iceberg aircraft carrier and the bearing of the mechanical properties of frozen wood pulp upon some problems of glacier flow // Journ. Glaciology. 1948. V. 1 (3). P. 95–104.
- Reichmus D.R. Correlation of experimental dependences force – movement with physical characteristics of rocks at percussion boring, in Rock Mechanics. Ed. C. Fairhurst. Proc. of the 1th Symposium of Rock Mechanics. University of Minnesota, 1962. Pergamon Press, Oxford-London-New York-Paris, 1963.
- Tatibouet J., Vassoille R., Perez J., Campbell W.J., Weeks W.F., Ramseier R.O., Gloersen P. Ultrasonic properties of plastically deformed ice // Journ. of Glaciology. 1975. V. 15 (73). P. 161–169.
- Tusima K., Kiuchi T. Development of high-speed ice-skating rink // Seppyo. Journ. Jap. Soc. of Snow and Ice. 1998. V. 60 (5). P. 349–356.
- ndn.info // Электронный ресурс. <https://ndn.info/novosti/29327-armirovannyj-led-dlya-strojki-mostov-izobrel-i-v-sibiri>. Дата обращения: 14.05.2024.
- <https://welcome.mosreg.ru> // Электронный ресурс. <https://welcome.mosreg.ru/stories/gornolyznye-kurorty-podmoskov-a-kuda-otpravitsa-etoj-zimoj>. Дата обращения: 14.05.2024.

Citation: Dzhumandzhi V.A., Shavlov A.V., Sokolov I.V., Yakovenko E.S. The effect of “annealing” on the specific crushing energy of the layered frozen ice. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (3): 464–474. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673424030115

The effect of “annealing” on the specific crushing energy of the layered frozen ice

V. A. Dzhumandzhi, A. V. Shavlov*, I. V. Sokolov, E. S. Yakovenko

Institute of the Earth's Cryosphere Tyumen Scientific Center SB RAS, Tyumen, Russia

**e-mail: shavlov@ikz.ru*

Received February 15, 2024 / Revised May 14, 2024 / Accepted July 8, 2024

The paper demonstrates realization of an experimental method of shock destruction of ice in order to study its specific energy of destruction and strength under various annealing conditions. Ice was prepared by layer-by-layer freezing of distilled water. The ice had a polycrystalline structure with a grain size of several fractions of a millimeter, judging by its ability to be broken into submillimeter fragments under the influence of shock load. It was shown that ice samples can be stored for a long time (several days) at a temperature of -18°C without changing their physical characteristics. Annealing of ice for more than 5 hours at a temperature of -1.5°C resulted in a decrease in the diameter of the holes formed on the ice surface by impacts of the ball by 20% and in an increase in the strength of the ice by 80%. Many hours of annealing at a temperature

of about 0 °C caused the opposite results: the diameter of the holes increased by 10–20%, and the strength decreased. The increase in ice strength at the annealing temperature of –1.5 °C was explained by a decrease in the specific surface energy of formation of cracks and a decrease in the size of the fragments into which the ice breaks. The decrease in strength at the annealing temperature of 0 °C is explained by ice recrystallization processes, which results in a decrease of the density of microcracks in the ice lattice, and in an increase of the size of fragments. Thus, annealing can significantly affect the strength. To strengthen ice, the annealing temperature must be high, but not too close to the melting point, so that noticeable recrystallization does not occur, leading to a loss of strength of the material.

Key words: ice, crystallization, annealing, strength, specific fracture energy

REFERENCES

- Bernal J. *Concluding remarks. Mekhanicheskiye svoystva novykh materialov*. Mechanical properties of new materials. Moscow: Mir, 1966: 241–254. [In Russian].
- Bernstein S.A. To the calculation of the strength of the ice layer at the crossing. *Vestnik Voenno-inzhenernoy akademii*. Bulletin of the Military Engineering Academy. 1935, 8: 3. [In Russian].
- Bogorodsky V.V., Gavrilov V.P. *Led. Fizicheskiye svoystva. Sovremennyye metody glyatsiologii*. Ice. Physical properties. Modern methods of glaciology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980: 384 p. [In Russian].
- Vdovin Yu.I., Krasnov Yu.N. *Opyt sozdaniya ledovykh plotin. Problemy inzhenernoy glyatsiologii*. Experience in building ice dams. Problems of engineering glaciology. Novosibirsk: Nauka, 1986: 177–183. [In Russian].
- Voytkovskiy K.F., Kamenskiy R.M., Konstantinov I.P. *Sozdaniye ledovykh massivov iz morskoy vody na melkovod'ye Arkticheskikh morey. Tezisy dokladov nauchno-tekhnicheskogo soveshchaniya «Problemy primeneniya ledovykh sooruzheniy na Tyumenskom Severe»*. Creation of ice massifs from sea water in the shallow waters of the Arctic seas. Abstracts of reports of the scientific and technical meeting “Problems of using ice structures in the Tyumen North”. Tyumen, 1982: 9–10. [In Russian].
- Grinevich D.V., Buznik V.M., Nuzhny G.A. *Obzor primeneniya chislennykh metodov dlya modelirovaniya deformatsii i razrusheniya l'da*. A review of the application of numerical methods for modeling ice deformation and fracture. *Proc. of VIAM*. 2020, 8 (90): 109–122. [In Russian].
- Danielyan Yu.S., Dolgikh G.M., Maier V.R. The project of the Yamburg experimental dam (with an ice core in its body). *Problemy inzhenernoy glyatsiologii*. Problems of engineering glaciology. Novosibirsk: Nauka, 1986: 183–189. [In Russian].
- Dunaev E.S. Sea water ice as a building material. *Trudy Dal'nevostochnogo politekhnicheskogo institute*. Proc. of the Far Eastern Polytechnic Institute. 1957, 46: 1–26. [In Russian].
- Epifanov V.P. Destruction of ice during impact interactions. *Doklady Akademii nauk SSSR*. Reports of the Academy of Sciences of the USSR. 1985, 284 (3): 599–603. [In Russian].
- Zelenin A.N. *Osnovy razrusheniya gruntov mekhanicheskimi sposobami*. Fundamentals of soil destruction by mechanical means. Moscow: Mashinostroenie, 1968: 376 p. [In Russian].
- Krai P. Influence of structure width on design ice loads. *Fizika i mekhanika l'da*. Physics and mechanics of ice. Moscow: Mir, 1983: 165–179. [In Russian].
- Likhomanov V.A., Kheisin D.E. Experimental study of the impact of a solid body on ice. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic, 1971, 38: 105–111. [In Russian].
- Saveliev B.A., Latalin D.A. *Iskusstvennyye ledyanyye platformy*. Artificial ice platforms. Moscow: VINITI, 1986: 193 p. [In Russian].
- Spivak A.I., Popov A.N. *Mekhanika gornykh porod*. Mechanics of rocks. Moscow: Nedra, 1975: 200 p. [In Russian].
- Ryzhenkov A.V. Pikerite and riserite are unusual materials for a cold climate. *Priroda i klimat*. Nature and climate. 2015, 3 (16): 29–33. [In Russian].
- Umerennoye namorazhivaniye l'da metodom dal'nestruynogo dozhdvaniya. Moderate freezing of ice by long-range sprinkling. Yakutsk: State University, 1982: 755 p. [In Russian].
- Kheisin D.E., Likhomanov V.A. Experimental determination of the specific energy of mechanical crushing of ice upon impact. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 1973, 41: 55–61. [In Russian].
- Tsuprik V.G. On the cyclic nature of the process of destruction of sea ice during its shock testing by a rigid sphere. *Problemy osvoiniya georesursov Dal'nego Vostoka*. Problems of development of georesources of the Far East. Moscow: Gornaya kniga, 2013: 26–40. [In Russian].
- Shavlov A.V. *Led pri strukturnykh prevrashcheniyakh*. Ice during structural transformations. Novosibirsk: Nauka, 1996: 182 p. [In Russian].
- Shavlov A.V., Ryabtseva A.A., Shavlova V.A. “Super-slippery” ice for speed skating. *Kriosfera Zemli*. Cryosphere of the Earth. 2007, 10 (2): 49–59. [In Russian].

- Shtremel M.A.* Destruction. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal*. Soros Educational Journ. 1997, 4: 91–98. [In Russian].
- Irwin G.R.* Engineering fracture Mechanics. V. 1. Pergamon Press, 1968: 241–257.
- Li, Jia Hui; Wei, Zhen; Wu, Chao.* Preparation and properties of novel building materials at low temperature. *Materials & Design*. 2015, 67: 464–468.
- Orlov M.Y., Orlova Y.N.* Phenomenological model and numerical method. In: Combined theoretical and experimental study of ice behavior under shock and explosive loads. Springer Briefs in Applied Sciences and Technology. Springer, Cham. 2022.
- Petrov I.B.* Problems of modeling natural and anthropogenic Processes in the Arctic Zone of the Russian Federation. Mathematical models and computer simulations. 2019, 11 (2): 226–246.
- Perutz M.F.* A description of the iceberg aircraft carrier and the bearing of the mechanical properties of frozen wood pulp upon some problems of glacier flow. *Journ. of Glaciology*. 1948, 1 (3): 95–104.
- Reichmus D.R.* Correlation of experimental dependences force – movement with physical characteristics of rocks at percussion boring, Ed Fairhurst, C, in *Rock Mechanics, Proc 1th Symposium of Rock Mechanics*. University of Minnesota, 1962. Pergamon Press, Oxford-London-New York-Paris, 1963.
- Tatibouet J., Vassoille R., Perez J., Campbell W.J., Weeks W.F. Ramseier R.O., Gloersen P.* Ultrasonic properties of plastically deformed ice. *Journ. of Glaciology*. 1975, 15 (73): 161–169.
- Tusima K., Kiuchi T.* Development of high-speed ice-skating rink. Seppyo. *Journ. Japan Society of Snow and Ice*. 1998, 60 (5): 349–356.
- ndn.info. Retrieved from: <https://ndn.info/novosti/29327-armirovannyj-led-dlya-strojki-mostov-izobreli-v-sibiri>. Last access: 14 May 2024.
- <https://welcome.mosreg.ru>. Retrieved from: <https://welcome.mosreg.ru/stories/gornolyznye-kurorty-podmoskov-a-kuda-otpravitsa-etoj-zimoj>. Last access: 14 May 2024.