

УДК 539. 2/6; 629.5

## Определение косвенной физико-механической характеристики морского льда — предела прочности при изгибе

Д-р техн. наук И. А. ВЕПРИНЯК<sup>1</sup>, канд. техн. наук С. В. КОШКИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>veprenyak1@mail.ru, <sup>2</sup>sergey.koshkin1950@yandex.ru

Военный институт (ЖДВ и ВОСО) Военной академии МТО им. генерала А. В. Хрулева

*Предложен метод определения косвенной характеристики прочности дрейфующего морского льда-предела прочности льда при изгибе. Обобщены результаты натурных экспериментов по разрушению консолей, выпиленных на (из) полях (ей) льда. Аппроксимирующие зависимости базируются на структурной модели прочности морского льда, как пористого тела. Изменение параметра предела прочности-объемного содержания рассола, рассматривается в двух диапазонах соответствующих малому и большому объему пор в ячеистой структуре. Отдельно рассмотрен и определен второй параметр — предел прочности пресного льда при изгибе. Показано, как эта характеристика пресного льда численно связана с его средней температурой и структурой (последняя — через балл разрушенности льда). Изложение метода сопровождается постоянным анализом результатов. Численное сравнение результатов определения предела прочности льда при изгибе показывают, его хорошую сходимость с экспериментальными данными и охватывают всю область определения этой косвенной характеристики льда. В выводах приведены причины условности предела прочности льда при изгибе как характеристики прочности. В заключении предложен другой критерий прочности льда, как упруго-пластичного и хрупкого тела.*

**Ключевые слова:** предел прочности при изгибе, морской дрейфующий лед, структурная модель прочности, содержание рассола, температура льда, пресный лед.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 17.02.2021, принята к печати 20.05.2021

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-3-81-89

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Веприняк И. А., Кошкин С. В. Определение косвенной физико-механической характеристики морского льда — предела прочности при изгибе // Вестник Международной академии холода. 2021. № 3. С. 81–89.

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-3-81-89

## Determination of the indirect physical and mechanical characteristics of sea ice — ultimate strength in bending

D. Sc. I. A. VEPRINYAK<sup>1</sup>, Ph. D. S. V. KOSHKIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>veprenyak1@mail.ru, <sup>2</sup>sergey.koshkin1950@yandex.ru

Military Institute (of Railway Troops and Military Transport) Of Khrulev Military Academy of Logistics

*A method is proposed for determining the indirect characteristic for the strength of drifting sea ice — the ultimate strength of ice in bending. The results of field experiments on the destruction of consoles cut out on fields of ice are generalized. The approximating dependences are based on the structural model for the strength of sea ice as a porous body. The change in the tensile strength parameter — the volumetric content of brine, is considered in two ranges corresponding to a small and large pore volume in a cellular structure. The second parameter, the ultimate strength of fresh ice in bending, is considered and determined separately. It is shown how this characteristic of fresh ice is numerically related to its average temperature and structure (the latter — through the score of ice destruction). The presentation of the method is accompanied by a constant analysis of the results. Numerical comparison of determining the ultimate strength of ice in bending shows that it is in good agreement with experimental data and covers the entire area of determining this indirect characteristic of ice. The conclusions give the reasons for the conventionality of the ultimate strength of ice in bending as a strength characteristic. In conclusion, another criterion for the strength of ice as an elastic-plastic and fragile body is proposed.*

**Keywords:** ultimate strength in bending, sea drifting ice, structural strength model, brine content, ice temperature, fresh ice.

### Article info:

Received 17/02/2021, accepted 20/05/2021

DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-3-81-89

Article in Russian

**For citation:**

Veprinyak I. A., Koshkin S. V. Determination of the indirect physical and mechanical characteristics of sea ice — ultimate strength in bending. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2021. No 3. p. 81–89. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-3-81-89

**Введение**

Средой движения ледоколов и судов ледового плавания являются различные формы образования льда на поверхности моря. Характерным случаем являются движения в полях сплошного льда. Описание механического взаимодействия корпуса судна со льдом, заканчивающееся его разрушением, требует знания физико-механических характеристик льда и, в том числе, пределов его прочности.

Ледяной покров неоднороден. При описании деформации льда, с разрушением в конце процесса, его можно считать однородным в плане, так как размеры неоднородностей намного меньше карты прогиба поликристаллического льда. Практически ледяную пластину считают изотропной в горизонтальной плоскости. По толщине у морского льда наблюдается изменение структуры и наличие градиентов солености и температуры, изменяющих его характеристики. При достаточно строгом подходе поле льда рассматривается как жесткая трансверсально-изотропная пластина небольшого прогиба на упругом основании [1]. Фактические напряжения должны определяться с использованием реальных значений упругопластических констант льда для каждого его слоя [2].

Критерием прочности при изгибе поля льда является предел прочности льда при растяжении. Для инженерной практики характерны значительные упрощения, сводящиеся к отказу от учета анизотропии льда по толщине, различий в поведении льда при растяжении и сжатии и использовании гипотезы о чисто упругой деформации льда вплоть до его разрушения. Это приводит к тому, что в качестве критерия прочности используют условную косвенную механическую характеристику льда — предел прочности льда на изгиб. С использованием  $\sigma_u$  проектируются ледоколы [3, 4], оно прописывается в технических заданиях на их проектирование [5], используется в гидротехническом строительстве [6]. В частности, при сдаче ледокола заказчику обязательным является определение  $\sigma_u$  для поля льда, где проводятся ходовые ледовые испытания [4].

При разработке прогнозируемой механической характеристики льда не привязанной к конкретному ледовому полю удалось учесть только два фактора: среднюю температуру льда и его соленость, определяющие содержание рассола во льду. По структуре двухслойный однолетний морской дрейфующий лед консервативен и практически всегда состоит из верхнего зернистого слоя типа В7 или В8 и нижнего конжеляционного типа В3 или В5, соответственно, по классификации Н. В. Черепанова.

Предел  $\sigma_u$  может определяться экспериментально различными способами [7]. Более предпочтительны значения  $\sigma_u$ , полученные при испытаниях на плаву выпиленных во льду консолей (клавиш) с приложением нагрузки сверху-вниз. Это в наибольшей степени соответствует взаимодействию корпусов ледоколов и гидротех-

нических сооружений с наклонными гранями с полями льда.

В статье произведен анализ и обобщение экспериментальных данных.

Малое количество данных не позволяет оценить погрешности измерений. Поэтому полученные в данной работе значения  $\sigma_u$  следует рассматривать как средние ожидаемые.

**Модель прочности морского льда**

Для описания результатов эксперимента по определению пределов прочности льда необходима физическая модель разрушения льда. Так для описания разрушения искусственных ледяных островов была использована теория композитов [7]. Но наибольшее распространение получили модели на основе физики твердого тела с порами. Такой схематизированный ячеистый лед показан на рис. 1 [7]. В нем цилиндрические ячейки заполнены рассолом и их суммарный объем определяет объемное содержание рассола  $v_p$  (без учета воздушных включений) — пористость тела.

С учетом неравномерности распределения напряжений (концентраций напряжений) в пористом теле зависимость предела прочности на растяжение пористого образования нелинейная [1]:

$$\sigma_{pr} \approx \sigma_p \left( 1 - \frac{v_p}{v_{max}} \right)^k, \quad (1)$$

где  $v_{max}$  — максимальный объем рассола (пористость) при которой лед еще обладает прочностью;  $\sigma_p$  — предел прочности сплошного льда (без пор) на растяжение с  $k \in 3...7$ , если объемное содержание рассола  $v_p < 0,3$ . В нашем случае (1) нужно воспринимать как структурную зависимость, например считать что,  $\sigma_{pr}$  и  $\sigma_p$ , это пределы прочности морского льда средней соленостью  $\bar{s}$  и средней температурой  $\bar{T} - \sigma_p(\bar{s}, \bar{T})$  и пресного льда  $\sigma_p(0, \bar{T})$ .

При малом  $v_p$  изменение предела прочности может описываться экспоненциальной зависимостью [8]:

$$\sigma_p(\bar{s}, \bar{T}) = \sigma_p(0, \bar{T}) \exp(-k_1 \cdot v_1), \quad (2)$$

где  $k_1$  — эмпирический коэффициент.

Андерсоном и Уиксом была разработана модель ячеистого льда [9] и получена первоначальная эмпирическая формула для предела прочности  $\sigma_p(\bar{s}, \bar{T})$ . В дальнейшем она уточнялась Ассуром и другими исследователями. Первоначально предполагалась, что местом начала разрушения являются участки, примыкающие непосредственно к ячейкам из-за концентрации напряжений. В дальнейшем стал преобладать подход о превалировании концов микротрещин (дефектов) во льду. Так же, Андерсоном и Уиксом было установлено (наблюдениями), что сечение ячеек чаще всего ближе к эллипсу  $r_b > r_a$  (рис. 1). Если считать, что изменение формы ячейки происходит только за счет размера  $r_b$  при  $r_a = \text{const}$ , то современ-

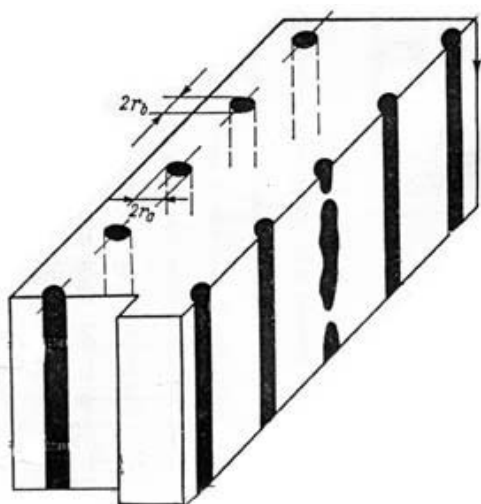


Рис. 1. Схематизированная схема ячеистая структура морского льда

Fig. 1. Schematic diagram of sea ice cellular structure

менный вариант теоретической прочности морского льда при растяжении будет [7]:

$$\sigma_p(\bar{s}, \bar{T}) = \sigma_p(0, \bar{T}) \left[ 1 - \left( \frac{v_p}{v_{max}} \right)^k \right], \quad (3)$$

где  $k \in 0,5 \dots 1$  — определяет форму ячейки ( $k=0,5$  — соответствует круглому сечению, а  $k=1$  — прямоугольному со скругленными краями).

Структурная зависимость (3) и является основой для обобщения результатов экспериментальных исследований по определению пределов прочности льда при растяжении  $\sigma_p(\bar{s}, \bar{T})$  и распространяется на предел прочности при изгибе  $\sigma_u(\bar{s}, \bar{T})$  (разрушение при изгибе начинается с зоны растяжения):

$$\sigma_u(\bar{s}, \bar{T}) = \sigma_u(0, \bar{T}) \left[ 1 - \left( \frac{v_p}{v_{max}} \right)^k \right]. \quad (4)$$

При ее использовании, зачастую, производят произвольное упрощение структуры (4):

—  $k$  директивно принимается равным 0,5 — соответствующим круглому сечению;

— прочность пресного льда  $\sigma_u(0, \bar{T})$  по умолчанию трактуется как постоянная величина  $\sigma_0$  — результат экстраполяции экспериментальных данных в область  $v_p \rightarrow 0$  (по существу является графическим пределом  $\lim_{\bar{s} \rightarrow \infty} \sigma_u(\bar{s}, \bar{T})$  с утратой физического смысла);

— после возрастания  $v_p$  до некоторого предельного значения происходит фактический «отказ» от зависимости (3) и принимается, что  $\sigma_u(\bar{s}, \bar{T}) = const$ .

Все это не может не сказаться на практической точности формул, обобщающих экспериментальные данные. По нашему мнению, значение  $k$  при аппроксимации экспериментальных данных должно в каждом случае подбираться индивидуально, наряду с общей зависимостью (4), для льда с малым содержанием рассола  $v_p$ , связанного с  $\bar{s}$  и  $\bar{T}$  формулой Франкенштейна – Гарнера

$$v_p = \bar{s} \left( 0,532 - \frac{49,185}{\bar{T}} \right), \quad (5)$$

здесь необходимо отдавать предпочтение зависимости (2); значения пределов прочности пресного льда  $\sigma_u(0, \bar{T})$  определять непосредственно обработкой результатов экспериментов по разрушению пресного льда соответствующей  $\bar{T}$  и структуры. При содержании рассола  $v_p > 50 \dots 60\%$  зависимость  $\sigma_u(v_p)$  практически линейная.

Консоли, выпиливаемые во льду цепной пилой или тепловым резаком должны соответствовать основным требованиям: длина не менее шести толщин льда  $H(7H, \dots, 10H$  — по рекомендациям МАГИ); ширина консоли  $1, \dots, 2H$ ; замер толщины льда должен проводиться в месте разрушения.

Результаты определения предела прочности  $\sigma_u(\bar{s}, \bar{T})$  припайного льда представлены на рис. 2. При этом произведена градация льда по диапазонам толщин:  $H=20, \dots, 30$  см и  $H=30, \dots, 95$  см.

Анализ прочности припайного льда приводит к следующим выводам:

— по характеру изменения зависимости  $\sigma_u(v_p)$  диапазон изменения  $v_p$  разделяется на два участка  $v_p < 50 \dots 60\%$  и  $v_p > 50 \dots 60\%$ ;

— при малом содержании рассола изменение  $\sigma_u(v_p)$  описывается соответствующей формулой (2) или (4) для структурной прочности льда;

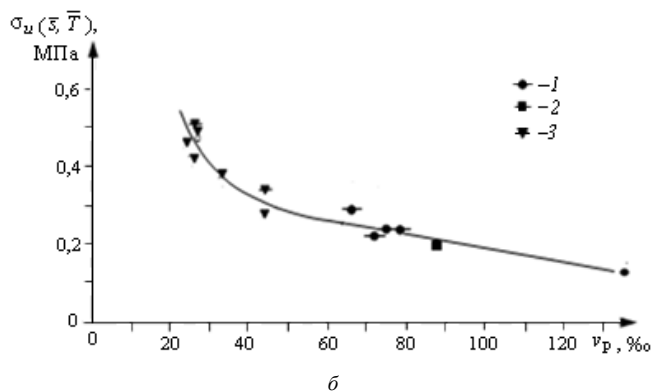
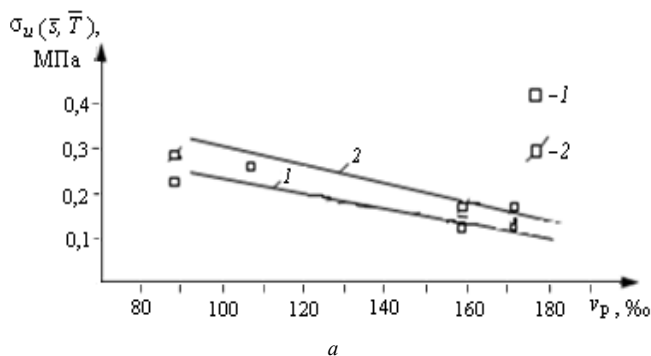


Рис. 2. Зависимость предела прочности припайного льда при изгибе  $\sigma_u(\bar{s}, \bar{T})$  от объема рассола.

Диапазоны толщин льда: а — 20...30 см; б — 30...95 см; обозначения точек соответствуют различным источникам  
Fig. 2. Dependency of ultimate strength of shore ice in bending  $\sigma_u(\bar{s}, \bar{T})$  on brine volume. Ice thickness ranges: а — 20...30 cm; б — 30...95 cm; the symbols in legend are for various sources

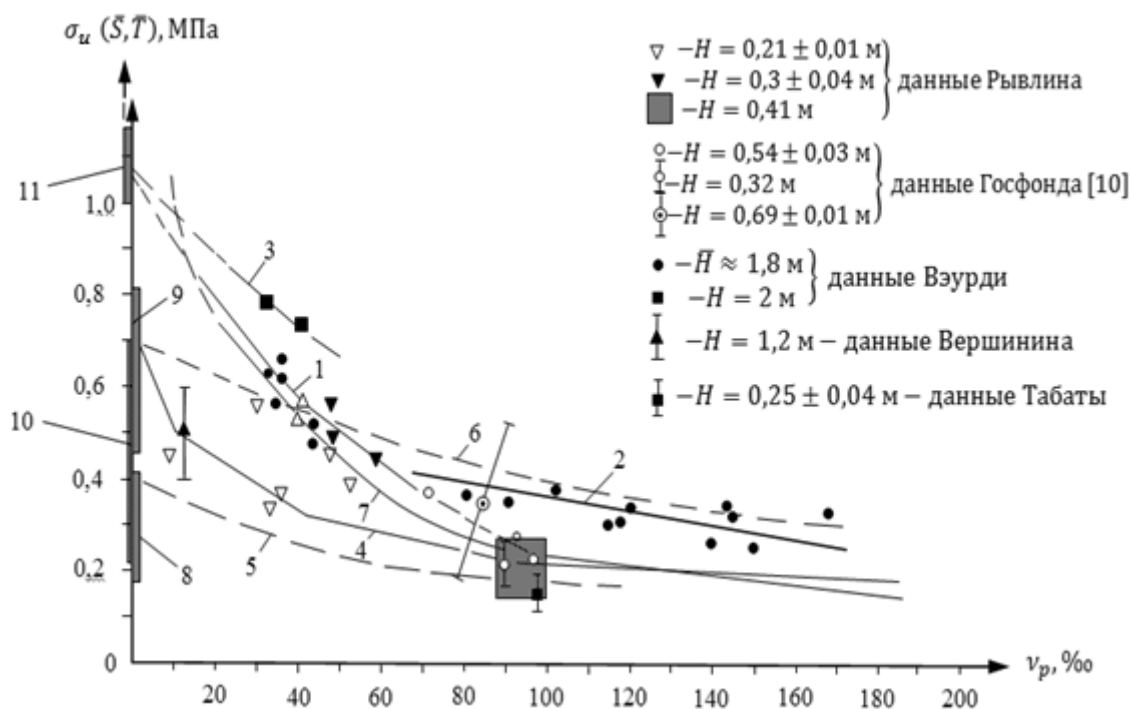


Рис. 3. Экспериментальные данные предела прочности дрейфующего льда при изгибе  $\sigma_u(\bar{s}, \bar{T})$  в зависимости от объема рассола, полученные при испытаниях консолей «изгибом вниз»

Fig. 3. Experimental data on ultimate strength of drifting ice in bending  $\sigma_u(\bar{s}, \bar{T})$  depending on brine volume, obtained by testing cantilevers bend down

Такое разделение диапазона  $v_p$  полностью соответствует выводам Уикса и Андерсона о наличии точки перегиба  $\sigma_u(v_p)$  при  $\bar{T} \approx -5^\circ\text{C}$  [8].

Дрейфующий лед подвержен большому влиянию динамических процессов при его росте при схеме нагружения «вниз» (что соответствует значению предел  $\sigma_u \downarrow$ ) имеет более нестабильное значение  $\sigma_u$ . Данные однозначно свидетельствуют, что отклонение от среднего не подчиняется нормальному закону распределения. Причем, число отклонений в меньшую сторону от среднего превышает аналогичное в большую.

Экспериментальные данные для предела прочности при изгибе  $\sigma_u(\bar{s}, \bar{T})$ , дрейфующего льда при нагрузке консоли по схеме «вниз» в зависимости от содержания рассола  $v_p$ , для толщины  $H > 0,3$  м, приведены на рис. 3. Обозначения точек на поле рис. 3 соответствуют толщинам льда  $H$ ; кривая 1 — соответствует формуле (6); 2 — (7); 3 — (8); 4 — (9); 7 — (12); 5, 6 — (10) при  $\sigma_u(0, \bar{T}) = 0,4$  и  $0,7$  МПа, 8, 9, 10 области  $\sigma_u(0, \bar{T})$  — соответствуют данным А. Я. Рывлина, Гоу, И. П. Бутягина и И. Г. Петрова.

На рис. 3 для анализа приведены данные для  $H \sim 0,2$  м. Область изменения  $\sigma_u(\bar{s}, \bar{T})$  ограничена сверху огибающей. Ее можно аппроксимировать двумя формулами, соответствующим структурным моделям прочности ячеистого льда (2) и (4) (кривые 1 и 2 на рис. 3):

— при  $v_p < 50 \dots 60\%$

$$\sigma_u(\bar{s}, \bar{T}) = 1,07 e^{-15,2 v_p}, \quad (6)$$

— при  $v_p > 60\%$

$$\sigma_u(\bar{s}, \bar{T}) = 0,53(1 - 3v_p). \quad (7)$$

Для экстремальных значений  $\sigma_u$  определенных Вэурди при  $\bar{T} \rightarrow -10^\circ\text{C}$  (температура верхней поверхности льда достигает значения  $T(H) = -18^\circ\text{C}$  и при толщине льда  $H_{\max} \sim 2$  м, получена формула:

$$\sigma_u(\bar{s}, \bar{T}) = 1,07 e^{-9,5 v_p}, \quad (8)$$

значения которой соответствует кривой 3 на рис. 3.

В качестве нижней огибающей можно согласиться с [7] и использовать значение предела прочности в соответствии со СНиПом II -57-75 [10] (кривая 4 на рис. 3). Нижнему минимальному пределу так же соответствует выражение, основанное на формуле Франкенштейна [11]:

$$\sigma_u(\bar{s}, \bar{T}) = \sigma_u(0, \bar{T}) (1 - v_p^{0,5})^2. \quad (9)$$

Если принять  $\sigma_u(0, \bar{T}) = 0,4$  МПа при  $\bar{T} \rightarrow -10^\circ\text{C}$  (по данным А. Я. Рывлина), то кривая 5 на рис. 3 хорошо согласуется с данными этого же автора [12] при  $v_p = 90 \dots 100\%$  (заштрихованный прямоугольник на рис. 3).

Анализ изменения экспериментальных данных  $\sigma_u(v_p)$  на рис. 3 приводит к следующим выводам:

— наиболее сильным изменениям подвержены значения  $\sigma_u(v_p)$  для тонкого льда  $H \sim 0,2$  м. С увеличением толщины льда диапазон колебаний уменьшается и значения  $\sigma_u$  приближаются к верхней границе области изменений. Это относится к области с относительно небольшим содержанием рассола  $v_p < 50 \dots 60\%$ , т. е. низкотемпературным льдом с  $\bar{T} < -5 \dots -6^\circ\text{C}$ ;

— с увеличением содержания рассола до  $v_p > 90 \dots 100\%$  (повышением температуры  $\bar{T}$  или солёности

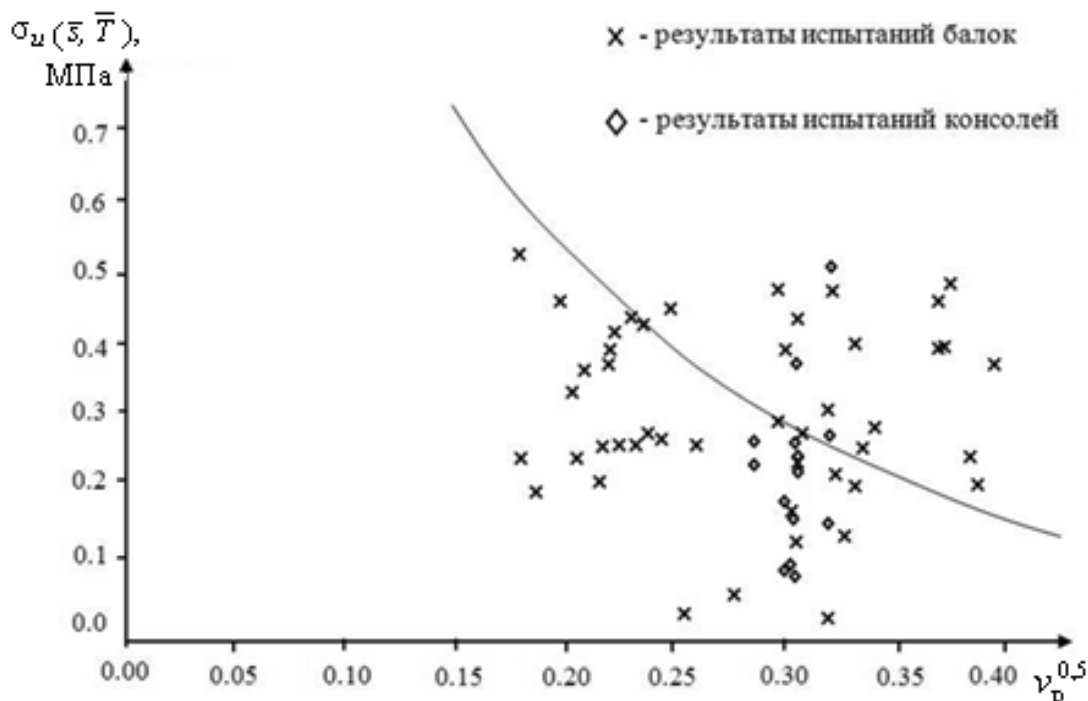


Рис. 4. Сопоставление экспериментальных данных по пределу прочности при изгибе балок и консолей с расчетными по формуле (9)  
 Fig. 4. Comparison of experimental data on ultimate strength in bending for beams and cantilevers with the design ones according to formulae (9)

$\bar{s}$ ), относительно тонкий лед с  $H < 1$  м в значительной мере начинает утрачивать прочность, и значения  $\sigma_u$  начинают «приближаться» к нижней границе области — кривая 1 на рис. 3. В рамках упругого поведения (изгиба) балки это можно объяснить только фактом одновременного снижения жесткости балки (увеличением кривизны нейтрального слоя) и прочности на растяжение  $\sigma_p(\bar{s}, T(H))$  верхней поверхности льда;

— толстый лед ведет себя иначе — предел прочности  $\sigma_p(\bar{s}, T(H))$  так же снижается, но жесткость балки в большей мере сохраняется из-за значительной тепловой инерции холодных срединных слоев льда. Результатом этого является менее интенсивное, чем у тонкого льда, снижение  $\sigma_u(\nu_p)$  — кривая 2 на рис. 3.

Существует несколько известных зависимостей аппроксимирующих экспериментальные данные. Большая часть из которых основана на упрощенном подходе к структурной модели прочности (4), когда значение  $k$  принимается равным 0,5 а значение  $\sigma_u(0, \bar{T})$  сводится к интерполяционной постоянной  $\sigma_0$ :

$$\sigma_u(\bar{s}, \bar{T}) = \sigma_0 (1 - c \cdot \nu_p^{0.5}). \quad (10)$$

Анализ данных по постоянным  $\sigma_0$  и  $c$  различных авторов свидетельствует о тенденции к повышению параметра  $\sigma_0$  до значений  $\sigma_u(0, \bar{T})$  и одновременно к снижению  $c$ , приводящим к более пологим зависимостям  $\sigma_u(\nu_p)$ .

Использование структуры формулы (9) с приравниванием предела прочности пресноводного льда  $\sigma_u(0, \bar{T}) = 0,7$  МПа — максимального значения по опытам Бутягина [13], приводит к тому, что кривая 6 (рис. 3) пересекает область значения  $\sigma_u(\nu_p)$  при малом  $\nu_p < 50\%$  и соответствует верхней границе  $\sigma_u$  при большом объеме рассола.

Особняком «стоит» формула Тимко и Брайена (1994):

$$\sigma_u(\bar{s}, \bar{T}) = 1,76 \exp(-5,88 \nu_p^{0.5}), \quad (11)$$

которая достаточно хорошо согласуется с теоретической зависимостью (2), если положить, что  $\sigma_u(0, \bar{T}) \approx 1,76$  МПа, а  $k_1 = 5,88 \nu_p^{-0.5} \neq \text{const}$ . Характер ее поведения показан на рис. 3 (кривая 7). Она свидетельствует о том, что в области  $\nu_p > 30\%$  (11) отражает данные по относительно тонкому льду  $H < 0,6 \dots 0,8$  м.

Сопоставление расчетных значений  $\sigma_u$  по (11) с экспериментальными данными по изгибу балок и консолей в Баренцевом море приведено в данных Госфонда Росгидромета и показано на рис. 4. Аналогичные сравнения экспериментальных данных с расчетами по формулам (10) и (12) приведены в работах [10, 11, 14, 15].

Проведенный анализ позволил выявить основные тенденции влияющие на прочность при изгибе, но вопрос с конкретизацией значений предела прочности  $\sigma_u(\bar{s}, \bar{T})$ , именно как предельной механической характеристики морского льда, остается нерешенным.

Пределы прочности дрейфующих льдов при испытаниях консолей на изгиб могут быть обобщены, на базе (2) и (4), формулой вида:

$$\sigma_u(\bar{s}, \bar{T}) = \sigma_u(0, \bar{T}) e^{-15,2 \nu_p}, \quad (12)$$

для диапазона  $\nu_p < 50 \dots 60\%$ . При большем содержании рассола зависимость будет уже линейной:

$$\sigma_u(\bar{s}, \bar{T}) = (0,463 \pm 0,027) \sigma_u(0, \bar{T}) (1 - 3 \nu_p). \quad (13)$$

Значения пределов прочности в соответствии с (13) обеспечивают непрерывность величины  $\sigma_u$  во всем диа-

пазоне  $v_p$ , за счет соглашения (12) и (13) при объеме рассола  $v_p = 0,065 \pm 0,005$ . При этом формулы полностью согласованы с теоретическими выражениями для структурной прочности ячеистого льда (2) и (4).

Предложенные выражения для определения прочности консолей требуют знания предела прочности пресного льда  $\sigma_u(0, \bar{T})$ . На рис. 3 на оси  $\sigma_u$  выделены характерные области изменений:  $\sigma_u(0, \bar{T})$  область 8 соответствует данным А. Я. Рывлина [12]; 9 — Гоу [7]; 10 — И. П. Бутягина [13] и 11 — И. Г. Петрова [16]. Чисто визуальная оценка значений говорит о слабой взаимной корреляции значений пределов прочности  $\sigma_u(0, \bar{T})$ , полученных авторами.

В принципе предел прочности консолей пресного льда на изгиб должен так же соответствовать структурным зависимостям (2) и (3) для пористого льда. В этом случае объемное содержание рассола  $v_p$  заменяется на пористость (воздушную) пресного льда

$$v_a = 1 - \frac{\rho_l(0, \bar{T})}{\rho_i(0, \bar{T})}, \quad (14)$$

где  $\rho_l(0, T)$  — плотность льда, а  $\rho_i(0, T)$  — плотность «чистого» льда без воздушных включений. Готовых обобщающих данных (формул, таблиц) для значений  $\rho_l$  нет, этот параметр определяется в процессе эксперимента. Эти значения можно получить экстраполируя данные Н. Н. Зубова [1] по  $\rho_l(\bar{s}, \bar{T})$  для льда малой солености в область  $\bar{s} \rightarrow 0$  (пресного льда):  $\rho_l(0, \bar{T}) = 0,921 \pm 0,0015 \text{ т.м}^{-3} \approx \text{const}$ . Неоднозначная картина и с определением плотности компактного льда  $\rho_i(0, T)$ . Достоверную линейную зависимость

$\rho_i(0, \bar{T})$  можно получить из непосредственных экспериментальных данных И. С. Песчанского [17]:  $\rho_i = 0,9176$  и  $0,9377 \text{ т.м}^{-3}$  для температур  $\bar{T} = 0$  и  $25^\circ\text{C}$ , соответственно.

Тогда

$$\rho_i(0, \bar{T}) \approx 0,9176 - 8,04 \cdot 10^{-4} \cdot \bar{T}. \quad (15)$$

Использование значений  $\rho_i(0, \bar{T})$  приводит к изменению пористости от практически нулевой, при температуре льда  $0^\circ\text{C}$  до  $v_a \sim 1 \cdot 10^{-2}$  при  $\bar{T} = 20^\circ\text{C}$ . Это свидетельствует о том, что пористость пресного льда с повышением его температуры понижается. В этом и состоит его кардинальное отличие от морского льда, когда при  $\bar{s} = \text{const}$  с повышением  $\bar{T}$  содержание рассола  $v_p$ , определяемого по формуле (5), повышается. Вследствие этого, структурные формулы типа (2) и (3) не подходят к определению предела прочности пресного льда  $\sigma_u(0, \bar{T})$ .

При неизвестной структурной зависимости  $\sigma_u(0, \bar{T})$  естественным является следующий прием — определять его непосредственной обработкой экспериментальных данных.

Предел прочности при изгибе пресного льда определяется в виде структурной зависимости:

$$\sigma_u(0, \bar{T}) = \sigma_u(0, 0) \left[ \frac{\sigma_u(0, \bar{T})}{\sigma_u(0, 0)} \right]. \quad (16)$$

Экспериментальные данные по значению отношений пределов прочности при изгибе пресного льда сведены на рис. 5. Если аппроксимировать отношение пределов прочности как среднюю линию области I на рис. 5, то она

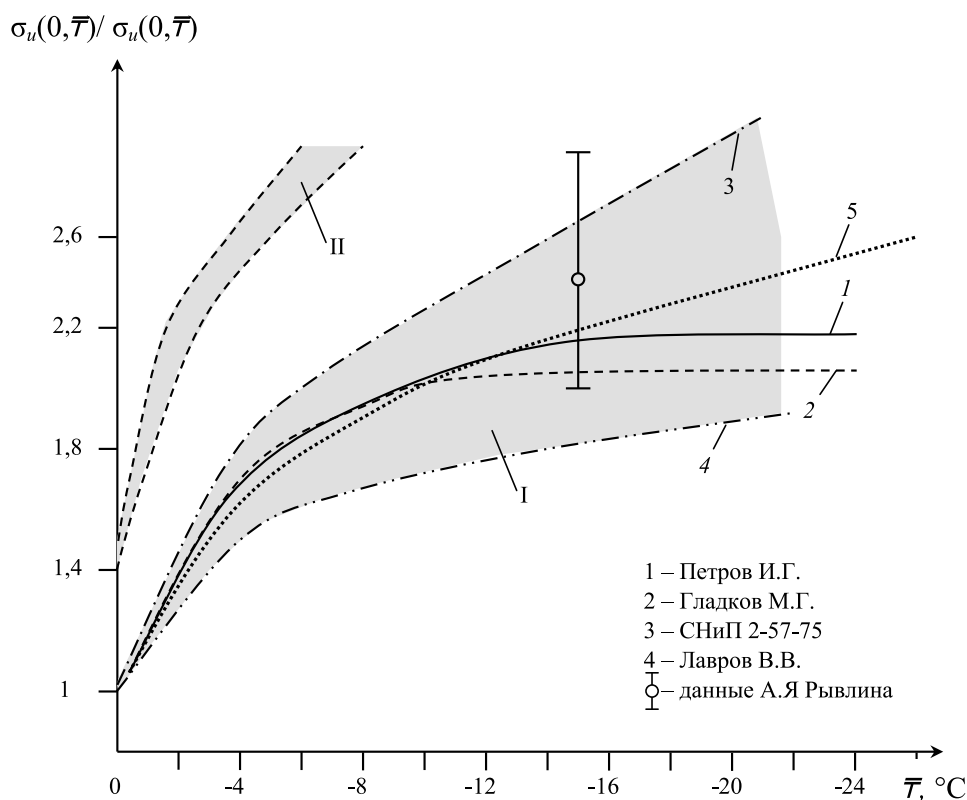


Рис. 5. Изменение отношений предела прочности пресного льда при изгибе (I — вероятная область; II — область значений по СНиП 2.06.04–82\* [6])

Fig. 5. Measurement of the ratios for ultimate strength of fresh ice in bending (I — probable range; II — range of values according to Construction Standards and Regulations 2.06.04–82\* [6])

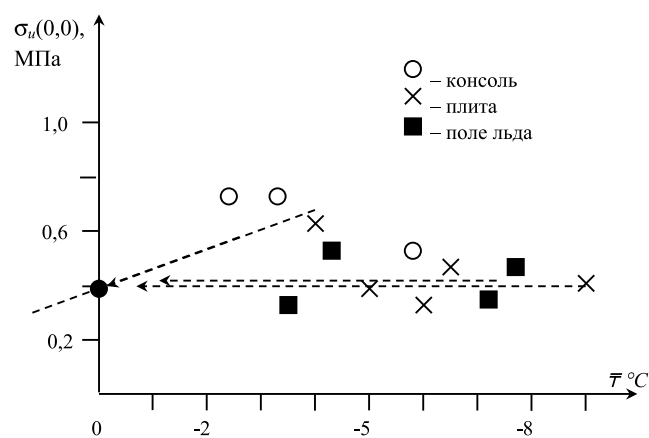


Рис. 6. Прогнозирование предела прочности пресного льда  $\sigma_u(0,0)$  по результатам экспериментов И.П. Бутягина [13]  
 Fig. 6. Forecasting ultimate strength of fresh ice  $\sigma_u(0,0)$  according to experimental results by I. Butyagin [13]

графически имеет вид кривой 5. Аналитически ей соответствует зависимость

$$\left[ \frac{\sigma_u(0, \bar{T})}{\sigma_u(0, 0)} \right] = 1 + 0,34(-\bar{T})^{0,5}. \quad (17)$$

При аппроксимации явно завышенные значения отношения, согласно СНиПу 2.06.04-82\* (область II на рис. 5), из рассмотрения исключались. Это связано с тем, что они получены в результате приближенной оценки  $\sigma_u(0, \bar{T})$  через прочность при сжатии льда [6].

Определение предела прочности пресного льда нулевой температуры  $\sigma_u(0,0)$  произведем по результатам экспериментов проведенных И. П. Бутягиным с ледовыми консолями, плитами и полями льда на р. Обь и его

водохранилище [13]. Значения  $\sigma_u(0, \bar{T})$  показаны на рис. 6. К «обработке принимались консоли» отвечающие по размерам МАГИ [7]:  $L > 6H$  и  $B > H$ . Температура льда определялась, как половина средней температуры воздуха за пять предшествующих суток, что для льда с  $H < 0,5$  м определено нормативными требованиями [6]. Экстраполяция данных в область  $\bar{T} = 0$  °C приводит к результату (рис. 6):  $\sigma_u(0, 0) = 0,42$  МПа. Это значение согласуется с диапазоном  $\sigma_u(0,0) \in 0,32 \dots 0,6$  МПа, определенным СНиПом 2.06.04-82\* [6].

Полученные результаты позволяют конкретизировать зависимости для предела прочности льда при изгибе определенного разрушением консолей при нагрузке «сверху-вниз», (МПа):

— при объеме рассола  $v_p < 0,06 \dots 0,07$ :

$$\sigma_u(\bar{s}, \bar{T}) = 0,42R^{-1} [1 + 0,34(-\bar{T})^{0,5}] e^{-15,2v_p}; \quad (18)$$

— при значении  $v_p > 0,07$ :

$$\sigma_u(\bar{s}, \bar{T}) = 0,194R^{-1} [1 + 0,34(-\bar{T})^{0,5}] (1 - 3v_p). \quad (19)$$

Здесь объем рассола  $v_p$  определяется по формуле связи (5), а  $R$  — задаваемый балл разрушенности льда.

Значения предела прочности  $\sigma_u(\bar{s}, \bar{T})$  определенные по (18) и (19) при  $R=1$  показаны на рис. 7. Сравнение с областью экспериментальных данных на рис. 3 свидетельствует, что они занимают верхнюю часть области значений предела  $\sigma_u(\bar{s}, \bar{T})$ .

Введение в (18) и (19) балла разрушенности льда  $R$ , связано с принятым значением  $\sigma_u(0, 0) = 0,42$  МПа, полученным по результатам испытаний на р. Обь. Для нее характерен значительный температурный градиент в осеннее — зимний период роста льда. В этом проявляется схожесть Сибирского льда с морями СМП. В то же время, по данным А. Я. Рывлина для льда

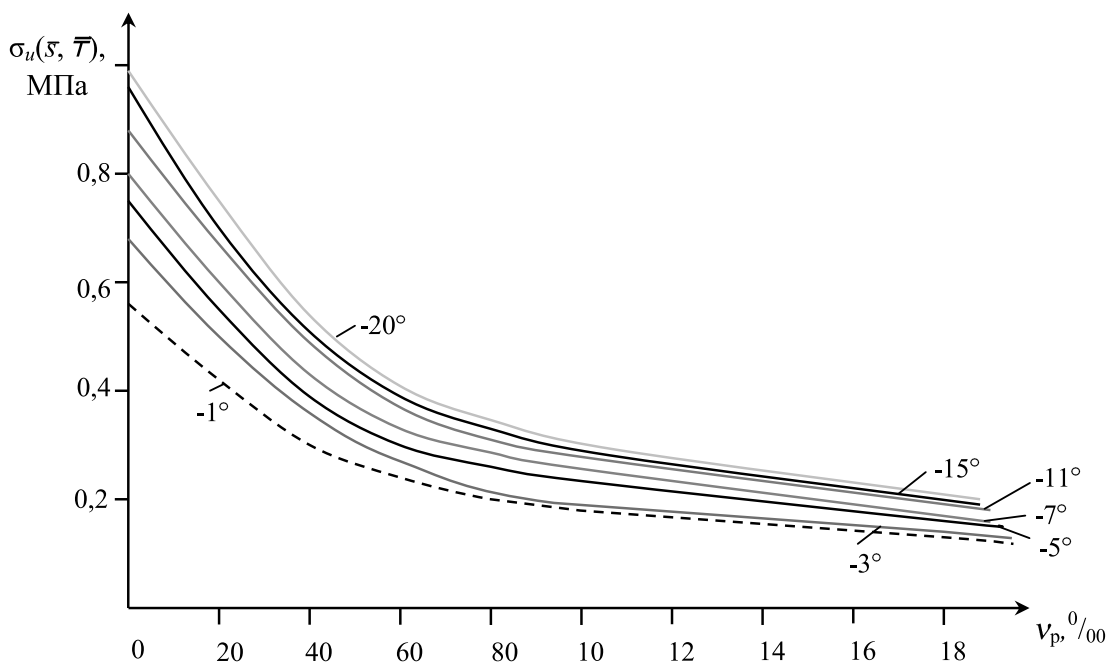


Рис. 7. Зависимость предела прочности льда при изгибе от относительного объемного содержания рассола  $v_p$  и средней температуры  $\bar{T}$  при  $\sigma_u(0,0) = 0,42$  МПа и балла разрушенности  $R = 1$

Fig. 7. Dependency of ultimate strength of ice in bending on relative volumetric fraction of brine  $v_p$  and average temperature  $\bar{T}$  at  $\sigma_u(0,0) = 0,42$  МПа and fracturing number  $R = 1$

Ладожского озера [12]. Для этого района температурный градиент мал, что близко к условиям роста льда Финского залива, Азовского и Каспийских морей. Для сохранения универсальности формул (18) и (19) необходимо соответственно откорректировать значение  $\sigma_u(0, 0) = 0,42$  МПа. Ориентировочно это можно выполнить, используя данные В. И. Смирнова [19], по влиянию балла разрушенности  $R$  на изменение  $\sigma_u$ . Если считать, что пределу прочности  $\sigma_u(0, 0) = 0,42$  МПа соответствует значение  $R = 1$  балл, то при  $R = 2, \dots, 3$  балла,  $\sigma_u(0, 0)$  уменьшается примерно в  $R$  раз, то есть до  $\sigma_u(0, 0) \in 0,22 \dots 0,14$  МПа. При этих значениях  $\sigma_u(0, 0)$  результатам определения  $\sigma_u$  по (18) и (19) соответствуют нижние части области  $\sigma_u(\bar{s}, \bar{T})$  на рис. 3. Необходимо, учитывая, что в (19) коэффициент  $0,194R^{-1} = 0,463 \cdot 0,42R^{-1}$  подобран так, что бы обеспечить непрерывность  $\sigma_u(\bar{s}, \bar{T})$  в районе перехода от зависимости (18) к (19) из-за роста объема рассола.

### Выводы

В результате обобщения экспериментальных данных по разрушению выпиленных в морском льду консолей, получены зависимости (18) и (19) косвенного (условного) показателя предела прочности льда — предела прочности при изгибе, от содержания рассола во льду  $v_p$  и предела прочности пресного льда. Разделение объема  $v_p$  на два диапазона вызвано различиями в зависимостях для прочности льда при малом и большем объеме пор в ячеистой структуре морского льда. Предел прочности пресного льда определен для различных районов через балл

разрушенности льда (морям СМП соответствует значение  $R = 1$ ) для льда со средней температурой  $\bar{T}$ .

### Заключение

Достаточно распространенное в практике использование предела прочности льда при изгибе  $\sigma_u(\bar{s}, \bar{T})$  в настоящее время не оправдано. Объясняется это только инженерной инерцией, берущей свое начало из традиционного рассмотрения деформации идеально упругого тела в сопротивлении материалов с использованием простейшей реологической модели — закона Гука. Усугубляется это противоречие и тем, что упругие постоянные для льда, как хрупкого упруго — пластичного материала, таковыми не являются. К примеру, это вызывает проблемы при моделировании льда в опытовых бассейнах [18, 19].

В настоящее время интенсивно ведутся научные работы по исследованию новых критериев прочности льда (в Крыловском государственном научном центре, университетах Петра Великого, ДВФУ и др.). Примером новых результатов, в рамках традиционного механического описания поведения льда являются работы А. Т. Беккера [20]. В другой кинетической концепции, основанной на работах Гриффитса, Ирвина и др. рассматривается процесс развития субмикроскопических разрушений (дефектов). Применительно к разрушению льда основополагающими являются работы С. А. Вершинина.

Объективно, со временем, эти новые модели войдут в нормативные документы при решении задач взаимодействия полей льда с судами и гидротехническими сооружениями.

### Литература

1. Доронин Ю. П., Хейсин Д. Е. Морской лед. Л.: Гидрометеоздат, 1997. 318 с.
2. Кошкин С. В. Обобщенная реологическая модель поведения льда под нагрузкой // Материалы международной НПК «Фундаментальные исследования океанотехники и морской инфраструктуры: Теория. Эксперимент. Практика» Комсомольск-на-Амуре, 2015. С. 238–240.
3. Ионо В. П., Грамузов Е. М. Ледовая ходкость судов. СПб.: Судостроение, 2001. 511 с.
4. Рывлин А. Я., Хейсин Д. Е. Испытания судов во льдах. Л.: Судостроение, 1980. 207 с.
5. Ионо В. П., Грамузов Е. М., Зуев В. А. Проектирование ледоколов. СПб.: Судостроение, 2013. 506 с.
6. СП 38.13330.2018. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые ледовые и от судов). Пересмотр СП. 38.13330.2012 с актуализированной редакцией СНиП 2.06.04–82\*. М.: Стандартинформ, 2019. 106 с.
7. Вершинин С. А. Воздействие льда на морские сооружения шельфа // Итоги науки и техники. Серия: Водный транспорт. 1983. Т. 13. 221 с.
8. Лосет С., Шкхине К. Н., Гудмestad О., Хойланд К. Воздействие льда на морские и береговые сооружения. СПб.: Лань, 2010. 271 с.
9. Anderson D. L., Weeks W. F. Theoretical analysis of sea ice strength // Trans. Amer. Geoph. Un. 1958. vol. 39, No 4, p. 632–640.

### References

1. Doronin Yu. P., Heisin D. E. Sea ice. L.: Hydrometeoizdat, 1997. 318 p. (in Russian)
2. Koshkin S. V. Generalized rheological model of ice behavior under load. Materials of the International Research and Development Center «Fundamental research of ocean engineering and marine infrastructure: Theory. Experiment. Praktika» Komsomolsk-on-Amur, 2015. pp. 238–240. (in Russian)
3. Ionov B. P., Gramuzov E. M. Ice seaworthiness of ships. St. Petersburg: Shipbuilding, 2001. 511 p. (in Russian)
4. Ryvlin A. Ya., Heisin D. E. Tests of ships in ice. L.: Shipbuilding, 1980. 207 p. (in Russian)
6. Code Of Rules 38.13330.2018. Loads and impacts on hydraulic structures (wave ice and from ships). Revision of SP. 38. 13330. 2012 with the updated version of SNiP 2.06.04–82\*. Moscow: Standartinform, 2019. 106 p. (in Russian)
7. Verшинin S. A. The impact of ice on offshore structures of the shelf. *Results of science and technology. Series: Water transport*. 1983. Vol. 13. 221 p. (in Russian)
8. Loset S., Shkhine K. N., Gudmestad O., Hoyland K. The impact of ice on marine and coastal structures. St. Petersburg: Lan, 2010. 271 p. (in Russian)
9. Anderson D. L., Weeks W. F. Theoretical analysis of sea ice strength. *Trans. Amer. Geoph. Un.* 1958. vol. 39, No 4, p. 632–640.
10. SniP II-57–75. Part II. Chapter 57 Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and from ships). Moscow: Stroyizdat, 1976. 41 p. (in Russian)



10. СНИП II — 57–75. Ч. II. Гл. 57 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). М.: Стройиздат, 1976. 41 с.
11. Гаврило В. П., Ковалев С. М., Недовишин О. А. Расчетные среднесезонные характеристики механических свойств однолетнего льда Баренцева и Карского морей. Справочник. СПб.: Гидрометеоздат, 1996. 42 с.
12. Рывлин А. Я. Метод прогнозирования предела прочности ледяного покрова на изгиб // Проблемы Арктики и Антарктики. 1974. Вып. 45. С. 79–86.
13. Бутягин И. П. Прочность льда и ледяного покрова. Новосибирск: Наука, 1996. 130 с.
14. Крупинина Н. А., Кубышкин Н. В. Прочность при изгибе дрейфующего ровного однолетнего морского льда в Баренцевом море // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. 2007. Вып. 34 (318). С. 139–159.
15. Сазонов К. Е., Добродеев А. А. Исследование прочности льда на изгиб в северо-восточной части Каспийского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. Вып. № 3 (101). С. 62–68.
16. Петров И. Г. Выбор наиболее вероятных значений механических характеристик льда // Труды ААНИИ. 1976. Т. 331. С. 4–41.
17. Песчанский И. С. Ледоведение и ледотехника. Л.: Гидрометеоздат, 1967. 461 с.
18. Смирнов В. И. Роль прочности льда при определении сроков эксплуатации морских арктических зимников // Труды ААНИИ. 1976. Т. 331. С. 212–216.
19. Koshkin S. V., Taranukha N. A. Physical and mechanical properties of sea ice in bending // IV Sino — Russian ASRTU Symposium on Advanced Materials and Processing Technology. Conference Paper, 2016 p. 64–70.
20. Беккер А. Т., Анохин П. В., Сабодаш О. А., Коваленко Р. Г., Уварова Т. Э., Помников Е. Е. Экспериментальное исследование физико-механических свойств модельного льда и их влияние на абразию материала конструкции ледостойких платформ // ГИАБ. 2014. С. 53–69.
21. Gavrilov V. P., Kovalev S. M., Nedovishin O. A. Calculated average annual characteristics of mechanical properties of annual ice of the Barents and Kara seas. Reference book. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1996. 42 p. (in Russian)
22. Rvlin A. Ya. Method of forecasting the bending strength of the ice sheet. *Problems of the Arctic and Antarctic*. 1974. Issue 45. pp. 79–86. (in Russian)
23. Butyagin I. P. The strength of ice and ice cover. Novosibirsk: Nauka, 1996. 130 p. (in Russian)
24. Krupinina N. A., Kubyshekin N. V. Strength in bending of drifting smooth annual sea ice in the Barents Sea. *Proceedings of the Central Research Institute named after Academician A. N. Krylov*. 2007. Issue 34 (318). pp. 139–159. (in Russian)
25. Sazonov K. E., Dobrodeev A. A. Investigation of ice bending strength in the north-eastern part of the Caspian Sea. *Problems of the Arctic and Antarctic*. 2014. Issue No. 3 (101). pp. 62–68. (in Russian)
26. Petrov I. G. The choice of the most probable values of the mechanical characteristics of ice. *Proceedings of the AANII*. 1976. Vol. 331. pp. 4–41. (in Russian)
27. Peschansky I. S. Ice science and ice engineering. L.: Hydrometeoizdat, 1967. 461 p. (in Russian)
28. Smirnov V. I. The role of ice strength in determining the service life of marine Arctic winter roads. *Proceedings of the AANII*. 1976. Vol. 331. pp. 212–216. (in Russian)
29. Koshkin S. V., Taranukha N. A. Physical and mechanical properties of sea ice in bending. *IV Sino — Russian ASRTU Symposium on Advanced Materials and Processing Technology*. Conference Paper, 2016 p. 64–70.
30. Bekker A. T., Anokhin P. V., Sabodash O. A., Kovalenko R. G., Uvarova T. E., Pomnikov E. E. Experimental study of the physical and mechanical properties of model ice and their effect on the abrasion of the material of the construction of ice-resistant platforms. *GIAB*. 2014. pp. 53–69. (in Russian)

### Сведения об авторах

#### Вепрняк Иван Алексеевич

Д. т. н., заведующий кафедрой общетехнических дисциплин Военного института (Железнодорожных войск и военных сообщений) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала А. В. Хрулева, 198511, г. Петергоф, ул. Суворовская 1, [veprenyak1@mail.ru](mailto:veprenyak1@mail.ru)

#### Кошкин Сергей Валентинович

К. т. н., доцент, преподаватель кафедры общетехнических дисциплин Военного института (Железнодорожных войск и военных сообщений) Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала А. В. Хрулева, 198511, г. Петергоф, ул. Суворовская 1, [sergey.koshkin1950@yandex.ru](mailto:sergey.koshkin1950@yandex.ru)

### Information about authors

#### Veprinyak Ivan A.

D. Sc., Head of Department of General Technical Disciplines Military Institute (of Railway Troops and Military Transport) of Khrulev Military Academy of Logistics, Russia, 198511, Peterhof, ul. Suworovskaya, 1, [veprenyak1@mail.ru](mailto:veprenyak1@mail.ru)

#### Koshkin Sergey V.

Ph. D., Associate Professor, Teacher of Department of General Technical Disciplines Military Institute (of Railway Troops and Military Transport) of Khrulev Military Academy of Logistics, Russia, 198511, Peterhof, ul. Suworovskaya, 1, [sergey.koshkin1950@yandex.ru](mailto:sergey.koshkin1950@yandex.ru)