

Научная статья

УДК 625.711

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-606-617>

EDN: OGDUUY



МЕТОДЫ РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛЕДОВЫХ ПЕРЕПРАВ

И.С. Кузнецов ✉, **В.В. Сиротюк**, **В.Н. Кузнецова***Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет «СибАДИ»,
г. Омск, Россия*✉ *ответственный автор*
ilyxa_kyznetsov@vk.com

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье рассматривается проблема, актуальная для территории нашей страны – расчёт несущей способности ледовых переправ и автозимников. Эта проблема всё более актуализируется в связи с развитием северных территорий, увеличением грузоподъёмности автотранспорта и величины грузопотока. При этом строительство постоянных дорог и мостовых переходов требует очень больших капитальных затрат, пока недоступных для РФ.

Методы и материалы. Выполнен критический анализ методов определения расчётным путём несущей способности ледового покрова на переправах (максимальной разрешённой нагрузки на ось одиночного автомобиля или автопоезда). Рассмотрены рекомендации нормативно-методических документов по данному вопросу. Представленный анализ отечественных и зарубежных публикаций позволил дать оценку математическим моделям разного уровня сложности и детализации, с разным набором факторов, влияющих на конечный результат.

Результаты. В результате исследований составлена сводная таблица, в которой приведены формулы для расчёта несущей способности ледового покрова, параметры, которые учитываются в этих формулах, а также значения несущей способности, рассчитанной по данным формулам для двух температур: 0°C и минус 20°C.

Заключение. По результатам анализа видно, что наибольшее количество параметров учитывается в трёх зависимостях: М.М. Казанского – Р.А. Шульмана; Q. Wang; ОДМ 218.4.030–2016 «Методические рекомендации по оценке грузоподъёмности ледовых переправ». При этом величина несущей способности, рассчитанная по 11 представленным формулам, изменяется в 2-3 и более раза. Следовательно, представленные математические модели для прогнозирования несущей способности ледовых переправ требуют экспериментальной проверки на реальных объектах методом протаскивания контрольного груза (при некоторой доработке этого метода).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ледовые переправы, несущая способность ледяного покрова, физико-механические свойства льда, формулы для расчёта несущей способности

Статья поступила в редакцию 03.03.2024; одобрена после рецензирования 05.06.2024; принята к публикации 14.08.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Кузнецов И.С., Сиротюк В.В., Кузнецова В.Н. Методы расчета несущей способности ледовых переправ // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 4. С. 606-617. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-606-617>

© Кузнецов И.С., Сиротюк В.В., Кузнецова В.Н., 2024

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-606-617>
EDN: OGDUUY

METHODS FOR ICE CROSSINGS LOAD CAPACITY CALCULATION

Ilia S. Kuznetsov ✉, **Viktor V. Sirotiuk**, **Viktoria N. Kuznetsova**
Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Russia, Omsk
✉ corresponding author
ilyxa_kyznetsov@vk.com

ABSTRACT

Introduction. The article deals with a problem relevant to the territory of our country – the calculation of the bearing capacity of ice crossings and winter roads. This problem is becoming more and more urgent in connection with the development of the northern territories, an increase in the carrying capacity of road transport and the volume of cargo traffic. At the same time, the construction of permanent roads and bridge crossings requires very large capital expenditures, which are not yet available for the Russian Federation.

Methods and materials. A critical analysis of methods for determining by calculation the bearing capacity of ice cover at crossings (the maximum permissible load on the axle of a single car or road train) was carried out. The recommendations of normative and methodological documents on this issue are considered. The presented analysis of domestic and foreign publications made it possible to evaluate mathematical models of different levels of complexity and detail, with a different set of factors influencing the final result.

Results. As a result of the research, a summary table, which contains formulas for calculating the bearing capacity of the ice cover, the parameters that are taken into account in these formulas, as well as the values of the bearing capacity calculated using these formulas for two temperatures: 0 °C and minus 20 °C has been compiled.

Conclusions. According to the results of the analysis, it can be seen that the largest number of parameters is taken into account in M.M. Kazansky-R.A. Shulman; Q. Wang; ODM 218.4.030-2016 Methodological recommendations for assessing the carrying capacity of ice crossings' dependencies. At the same time, the value of the bearing capacity, calculated according to the 11th formulas, varies by 2-3 or more times presented. Consequently, the presented mathematical models for predicting the carrying capacity of ice crossings require experimental verification on real objects by dragging the control cargo (with some refinement of this method).

KEYWORDS: ice crossings, bearing capacity of the ice sheet, physical and mechanical properties of ice, formulas for calculating the bearing capacity

The article was submitted 03.03.2024; approved after reviewing 05.06.2024; accepted for publication 14.08.2024.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Kuznetsov I.S., Sirotiuk V.V., Kuznetsova V.N. Methods for ice crossings load capacity calculation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (4): 606-617. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-606-617>

© Kuznetsov I.S., Sirotiuk V.V., Kuznetsova V.N., 2024



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Арктика находится в поле пристального внимания руководства России. В 2020 г. был принят ряд важных документов стратегического и долгосрочного планирования, определяющих государственную политику развития Арктической зоны. Важнейшей проблемой при реализации поставленных в этих документах задач является логистика на северных территориях. На текущий период ежегодно в России официально организуются и функционируют в зимний период более 1000 ледовых автозимников и переправ общей протяжённостью, измеряемой тысячами километров [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

В ближайшей перспективе альтернативы автозимникам и ледовым переправам не прослеживается:

– воздушный транспорт очень дорог, требует строительства аэродромов и не может обеспечить необходимый грузооборот;

– водный транспорт ограничен временем навигации на северных реках в 2-4 месяца и требует дополнительной доставки грузов до объектов другими видами транспорта;

– строить постоянные дороги и мосты экономически неоправданно из-за их значительной протяжённости, неразвитости транспортной сети арктических регионов и отсутствия баз строительной индустрии; срок окупаемости подобных транспортных объектов лежит за пределами их срока службы.

Поэтому дальнейшее развитие сети временных дорог, ледовых автозимников и переправ с обоснованными методами расчёта их допустимой грузоподъёмности и безопасности движения транспортных средств является актуальной задачей.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Расчёт несущей способности ледового покрова при динамическом воздействии транспортной нагрузки является сложнейшей задачей, т.к. зависит от десятков факторов, изменяющихся в широких пределах [8, 9, 10, 11, 12, 13]. Крупные исследования в этой области начались более 100 лет назад. На сегодняшний день разработано множество теоретических и прикладных методов расчёта несущей способности ледовых переправ (рисунок 1).

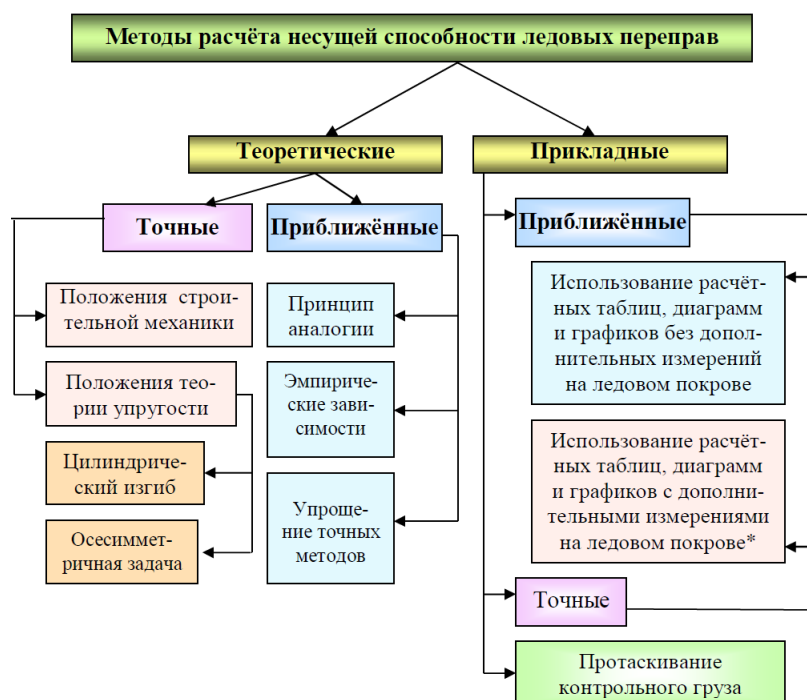


Рисунок 1 – Методы расчета ледовых переправ [14]

Figure 1 – Ice crossing calculation methods [14]

В случаях, когда необходимо быстро определить несущую способность ледового покрова, пользуются прикладными методами (таблицы, диаграммы, графики). Они, в свою очередь, подразделяются на две категории: приближённые и точные.

К приближённым относятся методы без проведения дополнительных измерений на ледовом покрове (к дополнительным измерениям не относится определение толщины ледового покрова). По температуре воздуха и толщине ледового покрова определяется допустимая нагрузка на лёд, скорость движения и дистанция между автомобилями.

К точным относятся методы с определением дополнительных параметров ледового покрова. Для этого из ледового покрова могут выпиливаться балки, они испытываются при помощи мобильных прессов (определяется предел прочности при изгибе).

Также известен способ, который рекомендуется нормативными документами¹, – протаскивание контрольного груза с массой, превышающей на 10% массу гружёного транспортного средства.

Теоретические методы тоже можно разделить на приближённые и точные. Приближённые методы рассматривают одиночную нагрузку (короткие передачи) и основываются на эмпирических зависимостях (П.И. Лебедев), принципе аналогии (М.М. Корунов) или являются упрощением точных методов (М.М. Казанский и А.Р. Шульман)².

К числу упрощённых расчётных приёмов относится метод аналогий, основанный на том, что при изгибе пластинки по цилиндрической поверхности возникающие напряжения будут равны напряжениям в бруске прямоугольного сечения высотой h , равной толщине льда, и шириной $b = 1$. Нагрузка на лёд прямо пропорциональна квадрату его толщины. По величине нагрузки и толщине льда для нормальной работы ледяного покрова можно произвести расчёт для любой толщины льда и нагрузки.

М.М. Корунов, предложивший этот метод, взял опытные данные, при которых лёд кристаллической структуры толщиной 24 см выдерживал груз массой $P = 6$ т и получил для практических расчётов следующую простейшую формулу²:

$$P = A \cdot h^2, \quad (1)$$

где P – максимальная нагрузка, кг; A – опытный коэффициент, кг/см²; h – наименьшая фактическая толщина льда без снега, см.

Метод аналогии достаточно прост и даёт для предварительных расчётов удовлетворительные результаты. Однако на практике редко бывают аналогичные условия, кроме того, несмотря на то, что толщина льда является одной из основных характеристик, её недостаточно для определения несущей способности ледового покрова.

В зарубежных публикациях используется формула (1) как Gold formula. Проведённые в 2011 г. исследования показали, что несущая способность «белого» (мутного) льда снижена на 50% по сравнению с прозрачным льдом [15]. В связи с этим данная формула претерпела изменения, в которых учитывается наличие в ледяном покрове «белого льда». Зависимость выглядит следующим образом [16]:

$$P = A \cdot h^2 \left(1 + \frac{100 - \% \text{ белого льда}}{100} \right).$$

Также в этих исследованиях рекомендуются следующие значения коэффициента A : для прозрачного ледяного покрова без трещин – 3,5 кг/см² при температуре около 0 °С; при низкой температуре A возрастает до 17,5 кг/см².

В работе [17] приведены результаты испытаний по «проламыванию» льда разной толщины (рисунок 2). Сопоставление результатов расчётов и испытаний показало, что при значении коэффициента $A = 3,5$ кг/см² вероятность проламывания ледового покрова составляет 6%, а при значении $A = 7$ кг/см² вероятность возрастает до 40%.

¹ ОДН 218.010–98. Инструкция по проектированию, строительству и эксплуатации ледовых переправ [Электронный ресурс]. Введён 1998-10-01 // Кодекс. Право / ЗАО «Информационная компания «Кодекс». СПб., 2010.

² Песчанский И.С. Ледоведение и ледотехника. 2-е изд. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 461 с.

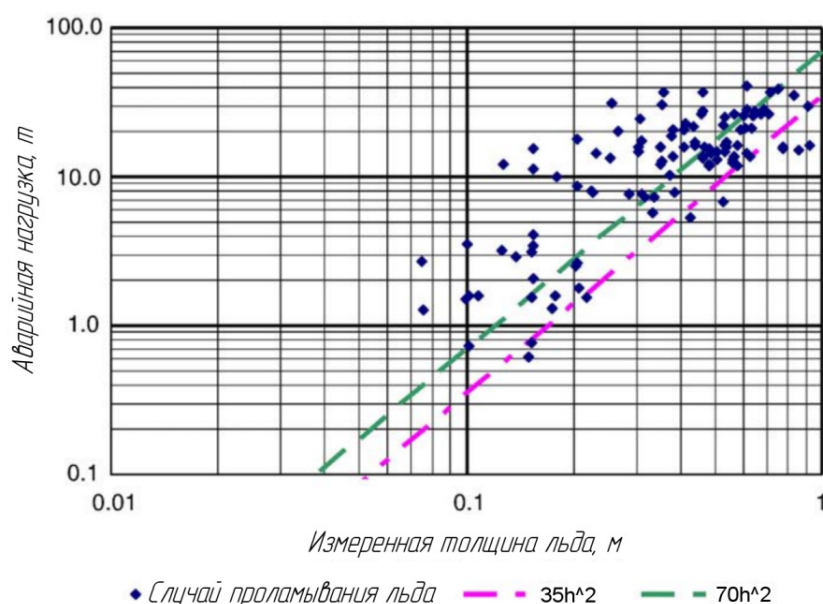


Рисунок 2 – Данные об аварийной нагрузке в зависимости от толщины льда [17]

Figure 2 – Emergency load data depending on the thickness of the ice [17]

Известна зависимость, предложенная М.М. Коруновым, основанная на методе аналогии (2)²:

$$P = \frac{h^2}{100}. \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) позволяют быстро определить несущую способность ледового покрова при одной основной характеристике – толщине льда. Однако их точность нельзя признать удовлетворительной, так как несущая способность может сильно отличаться даже при одинаковой толщине льда, при влиянии иных факторов.

Более достоверными являются формулы, полученные при решении осесимметричной задачи. Так, например, в работе приведена зависимость вида²

$$P = \frac{B}{N} h^2 K S, \quad (3)$$

где P – допускаемая нагрузка на лёд, т; B – коэффициент распределения нагрузки (100 – для колёсных грузов и 125 – для гусеничных массой до 18 т и 115 – массой более 18 т); h – наименьшая фактическая толщина

льда без снега, м; K – температурный коэффициент, определяемый по формуле

$$K = \frac{100 + \Theta}{100},$$

где Θ – температура воздуха за истекшие три суток: при положительных температурах $K=1-0,05n_1$, где n_1 – число суток с момента появления на льду воды; N – коэффициент запаса прочности и учёта трещин (таблица 1); S – коэффициент учёта солёности (1,0 – для пресных льдов и 0,7 – для солёных).

Формула (3) более совершенна, т.к. учитывает многие факторы, влияющие на несущую способность ледового покрова.

Зная значение предела прочности льда на растяжение при изгибе, можно найти разрушающую нагрузку по зависимости (4)³:

$$P = \frac{2 \cdot \sigma_{\text{и}} \cdot b \cdot h^2}{3 \cdot l}, \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{и}}$ – предел прочности льда на растяжение при изгибе, МПа; b – ширина балки, вырезаемой из ледяного покрова, м; l – расстояние между опорами при испытании, м.

³ Телов В.И. Наплавные мосты, паромные и ледяные переправы. М.: Транспорт, 1978. 384 с.

Таблица 1

Значения коэффициента запаса N для вычисления допускаемых напряжений⁴

Table 1

Values of the reserve factor N for calculating permissible stresses⁴

Тип переправы	Ледовый покров			
	ненарушенный, постоянной толщины	неравномерной толщины	с сухими трещинами	со сквозными трещинами
Единовременные или периодически действующие автомобильные переправы с пропуском грузов на пределе прочности	1,0	1,20	1,25	1,6
Автотранспортные и гужевые трассы без верхнего строения, действующие периодически	1,20	1,50	1,75	2,0
Автотранспортные и гужевые трассы без верхнего строения, действующие постоянно	1,50	1,50	1,75	–
Автотранспортные и гужевые трассы с верхним строением, действующие постоянно	1,30	1,30	1,50	–
Железнодорожные переправы	2,0	2,0	2,0	–

Из формулы (4) следует, что температура льда оказывает малое влияние на его прочность⁵, хотя это не так. В среднем значение данного параметра находится в пределах от 0,7 до 3 МПа. В приведённых далее расчётах примем значение $\sigma_{\text{л}}$ равным 1,5 МПа.

Также следует выбирать определённый размер балок для проведения эксперимента. Сечение балки должно быть квадратным, а её длина должна в 7-8 раз превышать ширину. При данных условиях с использованием зависимости (4) производились исследования, представленные в работе [18].

В работе [19] показана зависимость (5), сходная с (4):

$$P = \frac{4 \cdot \sigma_{\text{л}} \cdot b \cdot h^3 \cdot d}{l^3}, \quad (5)$$

где d – расстояние до центра приложения нагрузки, м.

При проведении исследований И.С. Песчанский получил зависимость несущей способности ледового покрова (6)²:

$$P = \frac{\sigma_{\text{л}} \cdot h^{5/4}}{31(0,76 \cdot r - h^{5/4})}, \quad (6)$$

где r – радиус эквивалентной круглой грузовой площадки при фактической грузовой площадке в форме прямоугольника длиной L и шириной A , м.

И.С. Песчанский исследовал зависимость влияния температуры на предел прочности льда на растяжение при изгибе. Согласно полученным в ходе эксперимента данным, при температуре -5°C предел прочности составляет 0,5 МПа, а при температуре -20°C данный показатель возрастает до 1,6 МПа. В целом полученные данные согласуются с результатами аналогичных экспериментов, проведённых В.В. Лавровым и Н.Д. Шишовым [20].

Используя полученную И.С. Песчанским зависимость прочности на растяжения от температуры, можно заменить показатель $\sigma_{\text{л}}$ на температуру льда, измерение которой занимает гораздо меньше времени, чем $\sigma_{\text{л}}$. Тогда зависимость (6) будет выглядеть следующим образом:

$$P = \frac{0,5 \cdot 10^6 \cdot (0,8 + 0,11 \cdot |t_{\text{л}}|) \cdot h^{5/4}}{31(0,76 \cdot r - h^{5/4})},$$

где $t_{\text{л}}$ – температура льда, $^\circ\text{C}$.

⁴ Песчанский И.С. Ледоведение и ледотехника. 2-е изд. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 461 с.

⁵ Степанюк И.А. Технологии испытаний и моделирования морского льда. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 77 с.

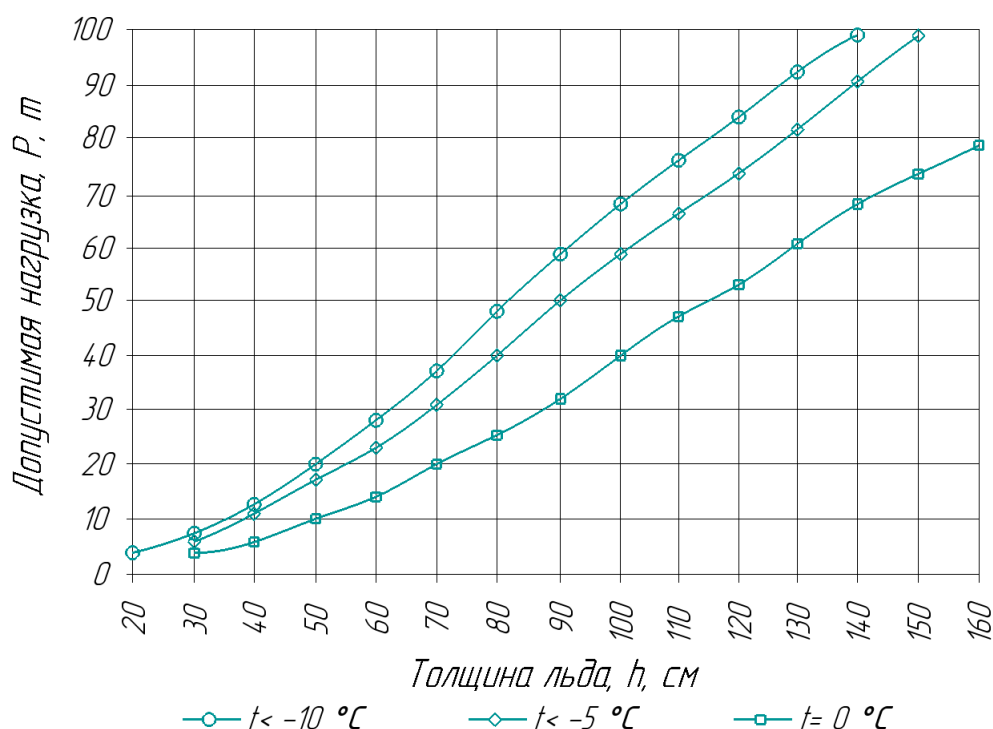


Рисунок 3 – Зависимость допустимой максимальной нагрузки от толщины льда
Источник: ОДМ 218.4.030–2016.

Figure 3 – Dependence of permissible increased load on ice thickness
Source: ODM 218.4.030-2016.

Основными документом, применяемыми на практике при проектировании ледовых автотрасс, являются ГОСТ Р 58948–2020, ОДМ 218.4.030–2016 и ОДН 218.010–98. В них предлагается использовать методику, в которой необходимо задать толщину льда и коэффициенты, учитывающие его структуру и наличие армирования. Зависимость выглядит следующим образом (7):

$$P = \left(\frac{h_{\text{пр}} + 0,5h_{\text{мут}}K_1}{11 \cdot n_{\text{и}}} \right)^2 K_2 K_3 K_{\text{арм}}, \quad (7)$$

где $h_{\text{пр}}$, $h_{\text{мут}}$ – толщина прозрачного и мутного льда, см; $n_{\text{и}}$ – коэффициент, учитывающий интенсивность движения транспорта; K_1 – коэффициент изменения общей структуры льда при его намораживании; K_2 – коэффициент запаса прочности при оттепелях; K_3 – коэффициент неравномерности структуры льда; $K_{\text{арм}}$ – коэффициент, учитывающий наличие армирующей прослойки из геосинтетического материала.

При необходимости можно применить график, полученный с использованием зависимости (7) (рисунок 3).

Многие авторы используют в своих работах результаты исследований Д.М. Мастерсона [17]. Им получены зависимости, из которых можно выразить максимальную величину нагрузки на ледовый покров (8):

$$P = \frac{\sigma_{\text{и}} \cdot h^2}{0,275 \cdot (1 + \mu) \cdot \log_{10} \left(\frac{E h^3}{k b^4} \right)}, \quad (8)$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости льда, Па; k – реакция опоры, для воды 9,81 кН/м³; b – коэффициент, рассчитанный как

$$b = \begin{cases} \sqrt{1,6c^2 + h^2} & \text{для } c < 1,724h \\ c & \text{для } c \geq 1,724h \end{cases}$$

где c – радиус приложения нагрузки.

Согласно стандарту ISO 19906 для расчёта максимальной величины нагрузки на ледовый покров с небольшим количеством видимых трещин можно использовать зависимость (9) [21]:

$$P = \frac{\sigma_n \cdot h^2}{0,529 \cdot (1 + 0,54\mu) \left[\lg \left(\frac{Eh^3}{kb^4} \right) - 0,71 \right]}, \tag{9}$$

где *b* определяется по вышеприведённой формуле.

Значения максимальной величины нагрузки, полученные с использованием зависимости (9), приблизительно на 40% ниже, чем значения, полученные при использовании зависимости (8), что объясняется применимостью зависимости (9) для льда с трещинами.

Для определения максимальной нагрузки на лед **авторами** получена зависимость (10), которая выглядит следующим образом:

$$P = \frac{\sigma_n \cdot h^2}{0,275 \cdot (1 + \mu) \cdot \lg_{10} \left(\frac{(5 \cdot t_n + 53) \cdot 10^6 \cdot h^3}{kb^4} \right)}. \tag{10}$$

При невозможности экспериментального определения предела прочности на растяжение при изгибе полученная авторами зависимость (10) принимает следующий вид (11):

$$P = \frac{0,5 \cdot 10^6 (0,8 + 0,11 \cdot |t_n|) \cdot h^2}{0,275 \cdot (1 + \mu) \cdot \lg_{10} \left(\frac{(5 \cdot |t_n| + 53) \cdot 10^6 \cdot h^3}{kb^4} \right)} \cdot K_T, \tag{11}$$

K_T – коэффициент запаса прочности при наличии трещин (*K_T* = 0,6).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты определения величины несущей способности ледового покрова, определённой по вышеприведённым формулам, представлены в таблице 2. Для расчётов приняты два значения толщины льда *h*: 20 и 50 см.

Таблица 2
Сравнение несущей способности льда, рассчитанной по различным методикам
Источник: составлено авторами с учётом⁶

Table 2
Comparison of ice bearing capacity calculated using different methods
Source: compiled by the authors taking into account⁶

Автор формулы	Формула	Несущая способность, т, при		Учитываемые параметры				
		<i>t</i> = 0 °С	<i>t</i> = минус 20 °С	вид нагрузки	наличие трещин	солёность воды	температура воздуха	прочность льда
М.М. Корунов (2)	$P = \frac{h^2}{100}$	4/25	4/25	–	–	–	–	–
М.М. Казанский и Р.А. Шульман (3)	$P = \frac{B}{N} h^2 K S$	4/25	4,8/30	+	+	+	+	–
А.В. Гастаев [14]	$P = \frac{\sigma h^2}{0,42 - 1,47 \cdot \lg \alpha} K S$	3,67/23	4,4/27,5	+	–	–	–	+
С.А. Бернштейн [14]	$P = \frac{m \cdot \sigma \cdot h^2}{3(1 + m)C_\alpha}$	3,6/22,5	4,35/27,2	+	–	–	–	+
А.Р. Шульман [14]	$P = 0,375(h^2 + 7,8rE^{1/4}h^{5/4})$	2,97/19	3,6/22,5	+	–	–	–	+
Д.Ф. Панфилов [14]	$P = 0,375h^2(1 + 4,1\alpha)$	2,8/17,5	3,4/21,3	+	–	–	–	+

⁶ Песчанский И.С. Ледоведение и ледотехника. 2-е изд. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 461 с.

Автор формулы	Формула	Несущая способность, т, при		Учитываемые параметры				
		$t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$t = \text{минус } 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	вид нагрузки	наличие трещин	солёность воды	температура воздуха	прочность льда
И.С. Песчанский (6)	$P = \frac{\sigma_n \cdot h^{5/4}}{31(0,76 \cdot r - h^{5/4})}$	3,4/13,1	3,95/15,3	+	–	–	–	+
ОДМ 218.4.030–2016 (7)	$P = \left(\frac{h_{\text{пр}} + 0,5h_{\text{мрт}}K_2}{11 \cdot n_n} \right)^2 K_3 K_4 K_{\text{арм}}$	2,3/14,4	3,3/20,6	+	+	–	+	+
Зависимость (8)	$P = \frac{\sigma_n \cdot h^2}{0,275 \cdot (1 + \mu) \cdot \log_{10} \left(\frac{Eh^3}{kb^4} \right)}$	2/9,5	2/9,5	+	–	–	–	+
Зависимость (9)	$P = \frac{\sigma_n \cdot h^2}{0,529 \cdot (1 + 0,54\mu) \cdot \left[\lg \left(\frac{Eh^3}{kb^4} \right) - 0,71 \right]}$	3,1/17,4	3,1/17,4	+	+	–	–	+
Зависимость (11)	$P = \frac{0,5 \cdot 10^6 (0,8 + 0,11 \cdot t_n) \cdot h^2}{0,275 \cdot (1 + \mu) \cdot \log_{10} \left(\frac{(5 \cdot t_n + 53) \cdot 10^6 \cdot h^3}{kb^4} \right)} \cdot K_T$	3,3/18,8	5,6/31,9	+	+	–	+	+
Примечания: 1. Для расчётов использованы усреднённые физико-механические показатели водного льда. 2. Несущая способность определена при толщине льда 20/50 см.								

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По результатам расчётов и анализа следует, что наибольшее количество параметров, влияющих на несущую способность ледового покрова, учитывается в трёх зависимостях: М.М. Казанского – Р.А. Шульмана; Q. Wang; ОДМ 218.4.030–2016 «Методические рекомендации по оценке грузоподъемности ледовых переправ». При этом величина несущей способности, рассчитанная по 11 представленным формулам, изменяется в 2,8 раза для толщины льда 20 см и в 3,4 раза – при 50 см. Следовательно, представленные математические модели для прогнозирования несущей способности ледовых переправ требуют экспериментальной проверки на реальных объектах.

2. Основной проблемой при сопоставлении данных по физико-механическим свойствам водного льда является отсутствие общепринятой и нормированной методики определения достоверных значений этих свойств.

3. Большинство математических моделей для прогнозирования несущей способности (прочности) ледового покрова основаны на закономерностях, полученных при испытаниях балок, призм, консолей и т.п. А фактически физическая модель ледового покрова на автомобильных переправах представляет очень сложную, неоднородную по площади и толщине пластину из упруго-пластического материала с трещинами, значительно изменяющего механические свойства от температуры и режима нагружения, лежащую на воде и берегах.

4. На несущую способность ледового покрова влияют десятки факторов, многие из которых изменяются случайным образом. Поэтому вышеприведённые формулы приемлемы для ориентировочного прогнозирования и расчётов несущей способности ледового покрова на переправах. Фактические достоверные значения этого показателя пока можно получать только доработанным методом регулярного протаскивания контрольного груза, моделирующего воздействие транспортных средств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гончарова Г.Ю., Сиротюк В.В., Якименко О.В., Орлов П.В., Долгодворов Р.Е. Повышение несущей способности и безопасности ледовых автотрасс с помощью армирования и модификации льда // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6 (94). С. 786–797. DOI 10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797
2. Сиротюк В.В., Якименко О.В., Крашенинин Е.Ю., Щербо А.Н. Строительство и испытание опытного участка ледовой переправы, армированной геосинтетическими материалами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2008. № 4(21). С. 157–165.
3. Голыцкий С.В., Кокин О.В., Кузнецова О.А., Цвезинский А.С., Архипов В.В. Оценка пределов прочности льда на одноосное сжатие в Охотском море по данным измерений и расчётов // Лёд и Снег. 2021; 61(4):561–570. DOI 10.31857/S2076673421040108
4. Babaei H., Barrette P. D. A computational modeling basis in support of the Canadian winter road infrastructure. – National Research Council Canada, 2020.
5. Towell K. L. T. et al. Construction and structural analysis of an arched cellulose reinforced ice bridge for transportation infrastructure in cold regions // Cold Regions Science and Technology. 2022. Т. 198. DOI 10.1016/j.coldregions.2022.103508.
6. Li C. et al. Theory and application of ice thermodynamics and mechanics for the natural sinking of gabion mattresses on a floating ice cover // Cold Regions Science and Technology. 2023. DOI 10.1016/j.coldregions.2023.103925.
7. Leppäranta M. Mechanics of Lake Ice // Freezing of Lakes and the Evolution of their Ice Cover. – Cham: Springer International Publishing, 2023. pp. 159–203. DOI 10.1007/978-3-031-25605-9_5
8. Ren D., Park J-C. Particle-based numerical simulation of continuous ice-breaking process by an icebreaker // Ocean Engineering. 2023. 270 p. DOI 10.1016/j.oceaneng.2022.113478.
9. Alan F., Willem J. Limitations of Gold's formula for predicting ice thickness requirements for heavy equipment // Canadian Geotechnical Journal. 2023. No. 61 (1). pp. 183–188. DOI 10.1139/cgj-2022-0464.
10. Ye L. Y. et al. Peridynamic solution for submarine surfacing through ice // Ships and Offshore Structures. 2020. Т. 15. no. 5. pp. 535–549. DOI 10.1080/17445302.2019.1661626.
11. Jia B. et al. Peridynamic Simulation of the Penetration of an Ice Sheet by a Vertically Ascending Cylinder // Journal of Marine Science and Engineering. 2024. Т. 12. no. 1. pp. 188. DOI 10.3390/jmse12010188
12. Tugulan C.C. et al. Flexural-Gravity Waves Generated by Different Load Sizes and Configurations on Varying Ice Cover // Water Waves. 2024. pp. 1–17. DOI 10.1007/s42286-024-00083-5
13. Q. Xie Numerical modeling of the stress-strain state of the ice beam by specified constitutive model // Material Science, Engineering and Applications. 1–8, Jun. 2022. Vol. 2, No. 1, pp. DOI 10.21595/msea.2022.22278
14. Якименко О.В. Сиротюк В.В. Усиление ледовых переправ геосинтетическими материалами: Монография. Омск: ФГБОУ ВПО «СибАДИ», 2015. 166 с. ISBN 978-5-93204-777-4.
15. Barrette P.D. A laboratory study on the flexural strength of white ice and clear ice from the Rideau Canal skateway. Can. J. Civ. Eng. 2011. 38, 1435–1439.
16. Weyhenmeyer G.A., Obertegger U., Rudebeck H. et al. Towards critical white ice conditions in lakes under global warming. Nat Commun. 2022. 13, 4974. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32633-1>
17. Masterson D.M. State of the art of ice bearing capacity and ice construction. 2009. 58(3), 0–112. doi:10.1016/j.coldregions.2009.04.002
18. Коновалов С.В. Обзор физико-механических свойств льда // Вестник науки и образования. 2020. №11-1 (89). С. 34–39.
19. Ren, Di; Park, Jong-Chun; Hwang, Sung-Chul; Jeong, Seong-Yeob; Kim, Hyun-Soo Failure simulation of ice beam using a fully Lagrangian particle method. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2019. 11(2). 639–647. doi:10.1016/j.ijnaoe.2019.01.001
20. Wang Q., Li Z., Lu P., Xu Y., Li Z. Flexural and compressive strength of the landfast sea ice in the Prydz Bay // East Antarctic, The Cryosphere. 2022. 16. 1941–1961. DOI 10.5194/tc-16-1941-2022.
21. Gow A.J. Flexural Strength of Ice on Temperate Lakes: Comparative Tests of Large Cantilever and Simply Supported Beams. Cold Regions Research and Engineering Laboratory. 1978. Т. 78. №. 9.

REFERENCES

1. Goncharova G.Y., Sirotiuk V.V., Yakimenko O.V., Orlov P.V., Dolgodvorov R.E. Loadbearing capacity and safety for winter roads improvement reinforcement and ice modification. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(6): 786–797. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797>. EDN: UTSJKO
2. Sirotiuk V.V., Sirotiuk V.V., Yakimenko O.V., Krashenin E.Yu., Shcherbo A.N. Construction and testing of a pilot section of an ice crossing reinforced with geosynthetic materials. *Journal of Construction and Architecture*. 2008; 4(21): 157–165. (In Russ.)
3. Godetsky S.V., Kokin O.V., Kuznetsova O.A., Tsvetsinsky A.S., Arhipov V.V. Estimation of ice strength limits for uniaxial compression in the Sea of Okhotsk according to measurements and calculations. *Ice and Snow*. 2021; 61(4) :561–570. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S2076673421040108>
4. Babaei H., Barrette P. D. A computational modeling basis in support of the Canadian winter road infrastructure. *National Research Council Canada*, 2020.
5. Towell K.L. T. et al. Construction and structural analysis of an arched cellulose reinforced ice bridge for transportation infrastructure in cold regions.

Cold Regions Science and Technology. 2022; T. 198. DOI 10.1016/j.coldregions.2022.103508.

6. Li C. et al. Theory and application of ice thermodynamics and mechanics for the natural sinking of gabion mattresses on a floating ice cover. *Cold Regions Science and Technology*. 2023. DOI 10.1016/j.coldregions.2023.103925.

7. Leppäranta M. Mechanics of Lake Ice. *Freezing of Lakes and the Evolution of their Ice Cover*. Cham: Springer International Publishing, 2023: 159–203. DOI 10.1007/978-3-031-25605-9_5

8. Ren D., Park J.-C. Particle-based numerical simulation of continuous ice-breaking process by an icebreaker. *Ocean Engineering*. 2023: 270. DOI 10.1016/j.oceaneng.2022.113478.

9. Alan F., Willem J. Limitations of Gold's formula for predicting ice thickness requirements for heavy equipment. *Canadian Geotechnical Journal*. 2023; 61 (1): 183–188. DOI 10.1139/cgj-2022-0464.

10. Ye L. Y. et al. Peridynamic solution for submarine surfacing through ice. *Ships and Offshore Structures*. 2020; T. 15. no. 5: 535–549. DOI 10.1080/17445302.2019.1661626.

11. Jia B. et al. Peridynamic Simulation of the Penetration of an Ice Sheet by a Vertically Ascending Cylinder. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024; T. 12. no 1: 188. DOI 10.3390/jmse12010188

12. Tugulan C.C. et al. Flexural-Gravity Waves Generated by Different Load Sizes and Configurations on Varying Ice Cover. *Water Waves*. 2024: 1–17. DOI 10.1007/s42286-024-00083-5

13. Xie Q. Numerical modeling of the stress-strain state of the ice beam by specified constitutive model. *Material Science, Engineering and Applications*. 2022; Vol. 2, No. 1: 1–8, Jun. 2022. DOI 10.21595/msea.2022.22278

14. Yakimenko O.V., Sirotyuk V.V. Strengthening ice crossings with geosynthetic materials. Omsk, SibADI, 2015: 166. (In Russ.)

15. Barrette, P.D. A laboratory study on the flexural strength of white ice and clear ice from the Rideau Canal skateway. *Can. J. Civ. Eng.* 2011; 38: 1435–1439.

16. Weyhenmeyer G.A., Obertegger U., Rudebeck H. et al. Towards critical white ice conditions in lakes under global warming. *Nat Commun*. 2022; 13, 4974. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32633-1>

17. Masterson D.M. State of the art of ice bearing capacity and ice construction. 2009; 58(3), 0–112. doi:10.1016/j.coldregions.2009.04.002

18. Konovalov S.V. Review of physical and mechanical properties of ice. *Vestnik nauki i obrazovaniya*. 2020; 11-1 (89): 157–165. (In Russ.)

19. Ren, Di; Park, Jong-Chun; Hwang, Sung-Chul; Jeong, Seong-Yeob; Kim, Hyun-Soo Failure simulation of ice beam using a fully Lagrangian particle method. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2019; 11(2): 639–647. doi:10.1016/j.ijnaoe.2019.01.001

20. Wang Q., Li Z., Lu P., Xu Y., Li Z. Flexural and compressive strength of the landfast sea ice in the

Prydz Bay. *East Antarctic, The Cryosphere*. 2022; 16: 1941–1961. DOI 10.5194/tc-16-1941-2022.

21. Gow A.J. Flexural Strength of Ice on Temperate Lakes: Comparative Tests of Large Cantilever and Simply Supported Beams. *Cold Regions Research and Engineering Laboratory*. 1978; T. 78. no. 9.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Кузнецов И.С. Обозначение алгоритма аналитических исследований. Обзор и анализ публикаций по заявленной тематике. Получение новых зависимостей. Выполнение расчетов (34%).

Сиротюк В.В. Формулирование проблемы исследований. Формулировка направления и темы исследования. Постановка задач исследования. Формулировка результатов и выводов (33%).

Кузнецова В.Н. Руководство процессом разработки темы. Выбор методологии и методов исследования (33%).

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Kuznetsov I.S. Analytical research algorithm outlining. Stated topic publications review and analysis. New dependencies obtaining. Calculations (34%).

Sirotyuk V.V. Research problem statement. Research area and topics statement. Research objectives statement. Results and conclusions formulation (33%).

Kuznetsova V.N. Topic development process guiding. Research methodology and methods selection (33%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Илья Сергеевич – преподаватель кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, д. 5), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6524-4976>, **SPIN-код:** 6890-3069, e-mail: ilya_kuznetsov@vk.com

Сиротюк Виктор Владимирович – проф., д-р техн. наук, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, д. 5), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2254-8803>, **SPIN-код:** 2583-7458, e-mail: sirvv@yandex.ru

Кузнецова Виктория Николаевна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ) (644050, г. Омск, просп. Мира, д. 5), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3546-0894>, **SPIN-код:** 1039-7546, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ilya S. Kuznetsov – Teacher of the Oil Gas and Construction Equipment Operation Department,

*Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospekt Mira, Omsk, 644050), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6524-4976>, **SPIN-код:** 6890-3069, e-mail: ilyxa_kyznetsov@vk.com*

*Viktor V. Sirotiuk – Dr. of Sci., Professor, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospekt Mira, Omsk, 644050), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2254-8803>, **SPIN-код:** 2583-7458, e-mail: sirvv@yandex.ru*

*Victoria N. Kuznetsova – Dr. of Sci., Professor, Oil Gas and Construction Equipment Operation Department, Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (5, Prospekt Mira, Omsk, 644050), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3546-0894>, **SPIN-код:** 1039-7546, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru*