

Научная статья

УДК 625.711

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-1018-1027>

EDN: ZHZDSN



Check for updates

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО ЛЬДА

И.С. Кузнецов , В.Н. Кузнецова

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)

г. Омск, Россия,

ответственный автор

iulyxa_kuznetsov@vk.com

АННОТАЦИЯ

Введение. В условиях Сибирского и Уральского федеральных округов эксплуатация нефтегазовых месторождений требует круглогодичного транспортного сообщения. Особое значение имеют автозимники и ледовые переправы, являющиеся ключевыми элементами логистики. Их надежность напрямую зависит от несущей способности льда, что делает актуальным поиск способов её повышения. Цель исследования – экспериментальное определение эффективности применения модифицирующих материалов и добавок для увеличения прочности ледовых переправ.

Методы и материалы. Для анализа использовались образцы льда, изготовленные из дистиллированной и речной воды (р. Иртыш, р. Омь), армированные древесной стружкой (пайкеритом), геосинтетическим материалом Армдор K100, а также с добавлением раствора поливинилового спирта (PVA 1788), и их комбинаций. Испытания проводились при температуре образцов -15°C с использованием лабораторного комплекса Gotech AI-7000 LA 10. Определялась деформативность льда при имитации нагрузки от проезда тяжелой колесной техники.

Результаты. Результаты экспериментов показали, что прочность льда зависит от состава воды – наибольшие показатели были у образцов из дистиллированной воды. Армирование геосинтетическими материалами и использование древесной стружки повышали несущую способность и деформативность льда. При этом применение поливинилового спирта оказалось наиболее эффективным.

Заключение. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования комбинированных технологий усиления льда, особенно в случае сочетания геосеток и модификаторов. Это обеспечивает повышение несущей способности ледовых переправ и возможность их эксплуатации при более высоких нагрузках. Рекомендовано проведение опытно-конструкторских испытаний в реальных условиях для дальнейшей проверки и внедрения предложенных конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ледовая переправа, механические свойства льда, несущая способность льда, предел прочности, модификация льда

Статья поступила в редакцию 12.09.2025; одобрена после рецензирования 14.12.2025; принята к публикации 15.12.2025.

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., Кузнецова В.Н. Экспериментальное исследование прочности модифицированного льда // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 6. С. 1018-1027. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-1018-1027>

© Кузнецов И.С., Кузнецова В.Н., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-1018-1027>

EDN: ZHZDSN

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF MODIFIED ICE COATINGS

Ilya S. Kuznetsov , Viktoria N. Kuznetsova

The Siberian State Automobile and Highway University
Omsk, Russia

 corresponding author
ilyxa_kyznetsov@vk.com

ABSTRACT

Introduction. In the conditions of the Siberian and Ural Federal Districts, the exploitation of oil and gas fields requires year-round transport communications. Of particular importance are winter roads and ice crossings, which are key elements of logistics. Their reliability directly depends on the bearing capacity of ice, which makes it important to search for ways to increase the latter. The purpose of the study is to experimentally determine the efficiency of using modifying materials to increase the strength of ice crossings.

Methods and materials. Ice samples made from water of various compositions were used for the analysis, as well as ice samples reinforced with various materials: wood chips (pykrete), polyvinyl alcohol solution (PVA 1788), Armendor K100 geosynthetic material and their combinations. The tests were carried out at a temperature of -15 °C with the use of the Gotech AI-7000 LA 10 laboratory complex. The bending strength and deformability were determined when simulating heavy vehicle loads.

Results. The experiments have shown that the ice strength depends on the water composition: the highest values were found in samples made of distilled water. Reinforcement with geosynthetic materials and the use of wood chips significantly increased the bearing capacity and deformability of ice. The use of polyvinyl alcohol turned out to be the most effective.

Conclusion. The obtained results confirm the feasibility of using combined ice reinforcement technologies, especially a combination of geogrids and modifiers. This ensures increased reliability of ice crossings and the possibility of their operation under higher loads. It is recommended to conduct experimental design tests in real conditions for further verification and implementation of the proposed designs.

KEYWORDS: ice crossing, physical and mechanical properties of ice, bearing capacity of ice, tensile strength, ice modification

The article was submitted: September 12, 2025; **approved after reviewing:** December 14, 2025; **accepted for publication:** December 15, 2025.

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., Kuznetsova V.N. Experimental determination of physical and mechanical characteristics of modified ice coatings. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (6): 1018-1027.
<https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-6-1018-1027>

© Kuznetsov Ilya S., Kuznetsova Viktoria N., 2025



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

ВВЕДЕНИЕ

На территории Сибирского и Уральского федеральных округов расположено множество месторождений нефти и газа, которые чаще всего находятся в отдалении от крупных городов в условиях недостатка транспортной инфраструктуры. Для перекачки добываемых полезных ископаемых обычно используют трубопроводы, но для оснащения нефтепромысловых кустов обязательно необходимы дороги, по которым осуществляется поставка оборудования, необходимых продуктов и персонала. Добыча полезных ископаемых не останавливается круглый год, поэтому важно обеспечить надежность транспортного сообщения в течение всего года. Особенно это актуально в зимний период, ведь для организации транспортного сообщения используют автозимники и ледовые переправы [1, 2, 3, 4].

В большинстве случаев по пути строительства автозимника расположены различные водные преграды, такие как озера и реки. Если пусть следования автозимника прокладывают в обход озер, то обойти реку часто не пред-

ставляется возможным. В таком случае необходимо организовать ледовую переправу, которая должна стать надежным связующим звеном частей сухопутного автозимника. От максимальной несущей способности ледовых переправ зависит максимально допустимая нагрузка на автозимник [5, 6, 7, 8]. Цель исследования состоит в экспериментальном определении наиболее предпочтительных методов повышения несущей способности ледовой переправы путем использования модифицирующих материалов.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Расчет несущей способности переправы является достаточно трудоемкой задачей. Существует множество факторов, которые влияют на этот параметр и могут изменяться в широком диапазоне. К сегодняшнему времени сформировано большое количество как теоретических, так и прикладных методов определения несущей способности ледового основания (рисунок 1) [9, 10, 11, 12, 13, 14].

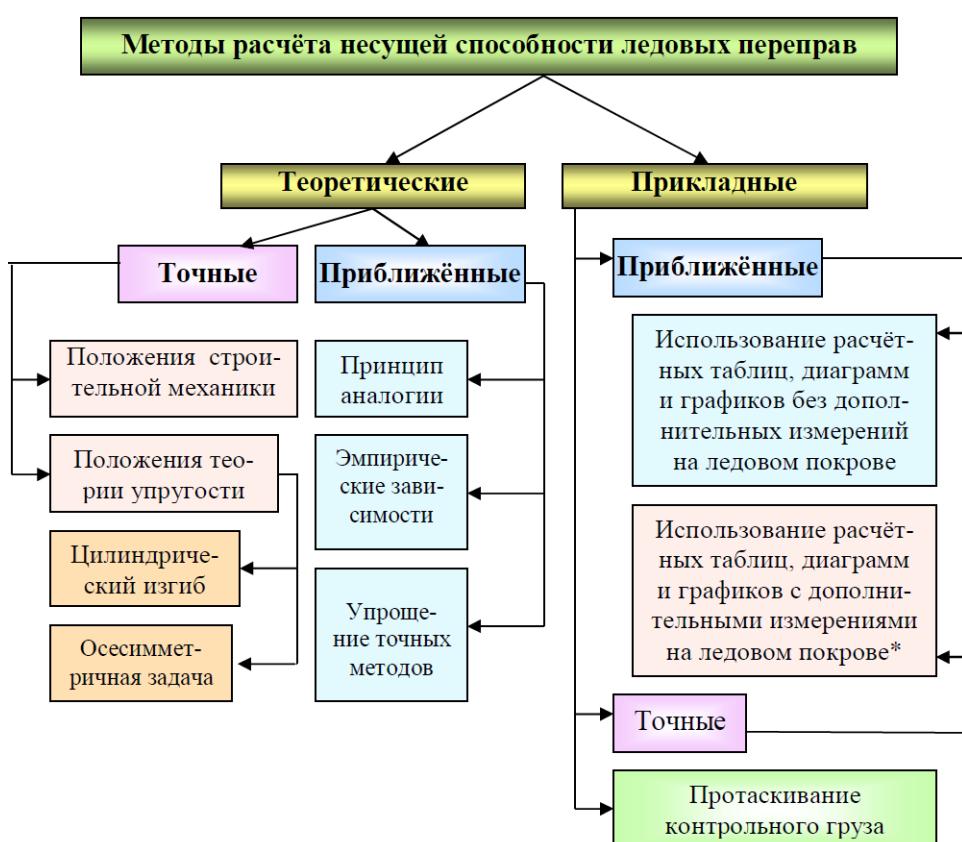


Рисунок 1 – Методы расчета несущей способности [15]

Figure 1 – Bearing capacity calculation methods [15]

Для ускоренного определения несущей способности льда часто используют прикладные методы, такие как таблицы и графики, которые описаны в нормативных документах по строительству ледовых переправ¹. По среднесуточной температуре и по измеренной толщине льда определяют его несущую способность [16, 17, 18, 19]. Но существуют и более точные методы определения прочности льда. Например, на месте обустройства переправы из ледового покрова можно выпилить балочки для последующего испытания при помощи мобильного пресса для определения предела прочности. Такой метод дает более точный результат, так как учитывает фактическое состояние ледового покрытия на месте строительства. Это очень важный параметр, ведь в зависимости от структуры льда его прочность может отличаться на десятки процентов [20, 21, 22, 23].

При лабораторных испытаниях образцов льда можно оценить влияние тех или иных факторов на его прочность. На сегодняшний день отсутствует общепринятая и научно обоснованная методика проведения сравнительных испытаний водного льда.

Для замораживания образцов льда использовали воду из 3 источников: дистиллированная вода, вода из реки Оми, вода из реки Иртыш. Речная вода обладает большим количеством примесей, что влияет на характеристики получаемого льда.

Химический состав р. Иртыш может включать следующие компоненты:

- гидрокарбонаты (в период зимней межени их количество находится в пределах 178–182 мг/л);
- кальций (37,5–38,9 мг/л);
- хлориды (20,5–24,8 мг/л);
- магний (11,6–13,2 мг/л);
- сульфаты (22,91–27,67 мг/л);
- фосфаты-ионы (0,05–0,28 мг/л);
- ионы аммония и аммиака (1–1,23 мг/л).

Также в воде Иртыша могут присутствовать загрязняющие вещества, такие как железо, марганец, цинк, медь, фенолы, нефтепродукты. Их показатели могут значительно превышать ПДК.

Химический состав воды р. Оми характеризуется высокой степенью загрязнённости. Это связано с природными факторами (река берёт начало с Васюганских болот, откуда несёт

воды с большим количеством «химии») и воздействием человека (отходы химических удобренений, которые попадают в воду с дождём и ветром).

Некоторые загрязняющие вещества, которые ежегодно превышают предельно допустимые концентрации (ПДК) в воде Оми:

- соединения железа (1,5–2,8 ПДК);
- меди (3,6–4,1 ПДК);
- цинка (1,1–2,9 ПДК);
- марганца (16,5–20,3 ПДК);
- фенолы (2–3 ПДК);
- нефтепродукты (1,2–2 ПДК).

Наличие гуминовых соединений и железа приводит к тому, что показатели цветности и мутности Оми регулярно превышают предельно допустимые в 7–10 раз, окисляемости в 3–4 раза.

Для проведения эксперимента были сформированы образцы льда в виде плит размером 700x500x100 мм. В ходе данного эксперимента определяется влияние состава и способа формирования образцов льда на их несущую способность.

Были изготовлены следующие виды образцов:

- лед, сформированный из воды из различных источников (дистиллированная вода, вода из р. Иртыш, вода из р. Оми);
- 5 см льда и 5 см льда с использованием древесной стружки (послойно, снизу вверх);
- 5 см льда и 5 см льда с использованием 2%-го раствора поливинилового спирта (PVA 1788)(послойно, снизу вверх);
- лед, армированный геосинтетическим материалом Армдор K100;
- комбинированная ледяная плита № 1 (5 см льда, геосетка Армдор K100, 5 см льда с использованием древесной стружки)(послойно, снизу вверх);
- комбинированная ледяная плита № 2 (5 см льда, геосетка Армдор K100, 5 см льда с использованием 2%-го раствора поливинилового спирта) (послойно, снизу вверх).

Сформированные образцы замораживались в климатической камере до достижения температуры образцов -15 °C в течение не менее 48 ч. После замораживания проверялись геометрические параметры и ровность образцов. При необходимости выполнялось выравнивание поверхностей плиты с последующим терmostатированием до нужной температуры в течение 24 ч.

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.



Рисунок 2 – Общий вид нагружочного устройства и образца льда после испытаний
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – General view of the loading device and ice sample after testing
Source: compiled by the authors.

Нагружение сформированных образцов осуществлялось вертикальным перемещением траверсы лабораторного комплекса Gotech AI-7000 LA 10. Испытания проводятся по разработанной авторской методике, при которой сформированные плиты доводили до разрушения для определения величины разрушающего давления при помощи штампа, имитирующего колесо автомобильной техники. В процессе нагружения выполнялась фиксация показаний индикаторов часового типа ИЧ-10, размещенных на расстоянии 100 мм от места приложения нагрузки. Это позволило определить деформации образцов в процессе нагружения.

Для имитации воздействия тяжелой техники на поверхность ледовой переправы в качестве штампа было использовано колесо, изготовленное из металлического сплава. Радиус колеса составил 180 мм, ширина колеса – 50 мм. В конце каждого эксперимента измерялась площадь пятна нагружения от колеса для определения разрушающего давления.

Образцы плит извлекают из форм, устанавливают на стенд-раму, изготовленную из стальных уголков размером 75x75x5 мм. На внутренней поверхности рамы закреплен слой отражающей теплоизоляции, который необходим для предотвращения оттаивания льда в

ходе проведения эксперимента и имитации нежесткого закрепления образцов, т.е. опирание плиты по контуру.

Для приложения нагрузки на поверхность образца к верхней траверсе испытательной машины закрепляют колесо на специальной оси, которая позволяет избежать смещения точки контакта в ходе проведения эксперимента. Для контроля прогиба верхней образующей поверхности плиты используют индикаторы часового типа. Под наконечники индикаторов подкладывают тонкий слой теплоизоляции, чтобы предотвратить оттаивание льда.

При проведении испытаний на испытательной машине устанавливают скорость вертикального перемещения траверсы, равной 6 мм/мин (рисунок 2).

В процессе приложения нагрузки тензометрический датчик, расположенный на траверсе, определяет и записывает максимальную приложенную к образцу нагрузку (кгс). Кроме того, в процессе нагружения фиксируются показания индикаторов часового типа.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице 1 приведены усредненные результаты, полученные при испытаниях не менее чем трех образцов, изготовленных по однотипной технологии.

Таблица 1
Величина разрушающей нагрузки для различных образцов льда
Источник: составлено авторами.

Table 1
The magnitude of the failure load for different ice samples
Source: compiled by the authors.

Вид образцов	Разрушающее давление, МПа
Лёд из дистиллированной воды	0,96
Лёд из воды р. Оми	0,84
Лед из воды р. Иртыш	0,88
Лёд из воды р. Оми с древесными материалами (пайкерит)	1,00
Модифицированный раствором ПВС	0,96
Армированный геосинтетическим материалом	1,05
Комбинированная ледяная плита № 1 (из воды р. Оми) *	1,02
Комбинированная ледяная плита № 2 (из воды р. Оми) **	1,23

* Комбинированная ледяная плита № 1 – конструкция из водного льда, армированного георешеткой и модифицированного древесной стружкой.

** Комбинированная ледяная плита № 2 – конструкция из водного льда, армированного георешеткой и модифицированного 2%-ным раствором поливинилового спирта.

Для образцов, изготовленных из дистиллированной воды и с применением воды из р. Оми, выполнялся контроль прогибов в процессе проведения эксперимента. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2
Величина разрушающей нагрузки и значения прогибов различных образцов льда
Источник: составлено авторами.

Table 2
The magnitude of the failure load and the values of deflections of various ice samples
Source: compiled by the authors.

Водный лёд	Разрушающее давление для льда из воды, МПа		Предельные значения прогиба в центре приложения нагрузки для льда из воды, мм		Предельные значения прогиба, на расстоянии 10 см для льда из воды, мм	
	Дистиллированная	р. Омь	Дистиллированная	р. Омь	Дистиллированная	р. Омь
Без армирования и модификации	0,96	0,84	0	0,1	0	0,08
С древесными материалами (пайкерит)	1,29	1,00	0,02	0,06	0,01	0,01
Модифицированный раствором ПВС	1,19	0,96	0,01	0,05	0	0,06
Армированный геосинтетическим материалом	1,07	1,05	0,06	0,05	0,02	0,02
Комбинированная ледяная плита № 1 *	1,00	1,02	0,01	0,15	0,05	0,1
Комбинированная ледяная плита № 2 **	1,39	1,23	0,08	0,07	0,07	0,05



Рисунок 3 – Вид образца, армированного геосинтетическим материалом, после проведения испытаний
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – View of a sample reinforced with geosynthetic material after testing
Source: compiled by the authors.

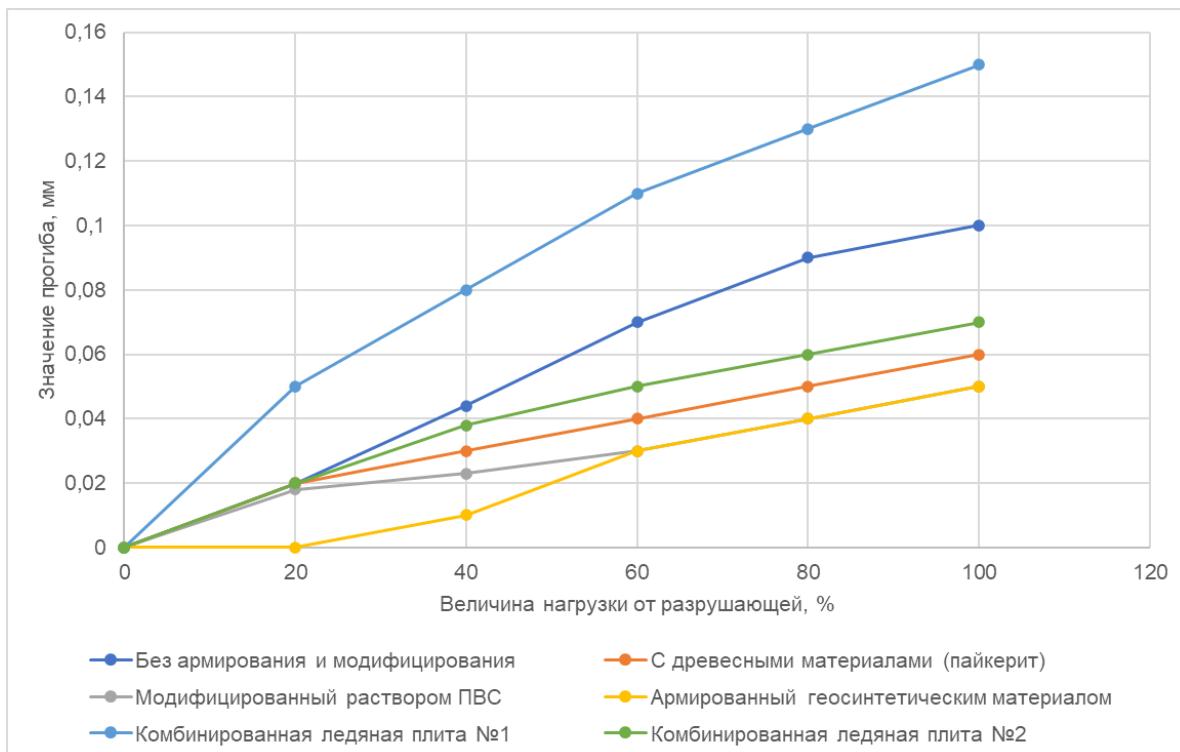


Рисунок 4 – Диаграмма значений прогибов при приложении нагрузки к различным образцам льда
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Deflection values when applying load to different ice samples
Source: compiled by the authors.

Результаты проведенного эксперимента позволяют сделать следующие выводы: если в образце не применяется армирование геосинтетическим материалом, то процесс разрушения водного льда носит хрупкий характер, а все трещины являются сквозными. Использование армирующего слоя позволяет не только распределить нагрузку по большей площади, но и связать отдельные элементы льда после разрушения. При этом на поверхности данной трещина носит закрытый характер, раскрытие трещины происходит в основном под геосинтетическим материалом. На рисунке 3 изображен общий вид образца, армированного геосинтетическим материалом, после проведения испытаний. Подобный характер разрушения также характерен для комбинированной ледяной плиты.

Результаты определения деформативности (прогибов) ледяной плиты без армирования и модифицирования, образцов с армированием и модифицированием, комбинированной ледяной плиты № 1 и комбинированной ледяной плиты № 2 от разрушающей нагрузки приведены на рисунке 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты испытаний показывают существенное влияние состава воды на характеристики образцов, полученных с применением водного льда, что необходимо учитывать при проведении проектно-изыскательских работ и обустройстве ледовых переправ с поверхностным намораживанием льда. Разница в значениях прочности между водой из различных источников и дистиллированной водой составляет в среднем 20%. Почти во всех случаях прочность водного льда из дистиллированной воды больше, чем из воды р. Оми и р. Иртыш. Это объясняется значительным количеством примесей, содержащихся в воде, которая находится в естественных условиях. Только армированный георешёткой пайкерит изо льда р. Оми показал прочность несколько выше, чем из дистиллированной воды.

Результаты испытаний показывают эффективность применения модификаторов ледового покрытия и геосинтетических материалов для армирования переправ: прочность увеличивается, при этом деформативность в некоторых случаях становится ниже. Отметим существенное отличие деформативности образцов с применением армирующих геосинтетических материалов и пайкерита от прочих испытанных образцов (к примеру, комбинированная ледяная плита № 1). На наш взгляд,

это связано с образованием дефектов при смачивании водой древесной стружки в районе ее границы с геосинтетическим материалом, что обеспечивает возможность большей деформации, не приводящей к разрушению конструкции.

В дальнейшем, на основании результатов проведенных исследований, могут быть сформированы рекомендации по строительству опытных участков ледовых переправ для проверки предлагаемых конструкций в реальных условиях эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Гончарова Г.Ю., Сиротюк В.В., Якименко О.В., Орлов П.В., Долгодворов Р.Е. Повышение несущей способности и безопасности ледовых автозимников с помощью армирования и модификации льда // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 6 (94). С. 786–797. [Https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797)
- Кузнецов И.С., Сиротюк В.В., Кузнецова В.Н. Методы расчета несущей способности ледовых переправ // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 4(98). С. 606–617. [Https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-606-617](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-606-617)
- 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.
- Годецкий С.В., Кокин О.В., Кузнецова О.А., Цвёцинский 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. [Https://doi.org/10.31857/S2076673421040108](https://doi.org/10.31857/S2076673421040108)
- Babaee H., Barrette P. D. A computational modeling basis in support of the Canadian winter road infrastructure. – National Research Council Canada, 2020.
- 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. [Https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103508](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103508)
- 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. [Https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103925](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103925)
- Leppäranta M. Mechanics of Lake Ice // Freezing of Lakes and the Evolution of their Ice Cover. – Cham: Springer International Publishing, 2023. pp. 159-203. [Https://doi.org/10.1007/978-3-031-25605-9_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-25605-9_5)
- Ren D., Park J-C. Particle-based numerical simulation of continuous ice-breaking process by an icebreaker // Ocean Engineering. 2023. 270 p. [Https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113478](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113478)

10. 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. [Https://doi.org/10.1139/cgj-2022-0464](https://doi.org/10.1139/cgj-2022-0464)
11. Ye L. Y. et al. Peridynamic solution for submarine surfacing through ice // Ships and Offshore Structures. 2020. T. 15. no. 5. pp. 535-549. [Https://doi.org/10.1080/17445302.2019.1661626](https://doi.org/10.1080/17445302.2019.1661626)
12. 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. pp. 188. [Https://doi.org/10.3390/jmse12010188](https://doi.org/10.3390/jmse12010188)
13. 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. [Https://doi.org/10.1007/s42286-024-00083-5](https://doi.org/10.1007/s42286-024-00083-5)
14. 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. [Https://doi.org/10.21595/msea.2022.22278](https://doi.org/10.21595/msea.2022.22278)
15. 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.
16. Сыромятникова А.С. Перспективы применения ледяных композиционных материалов для строительства ледовых переправ // Арктика: экология и экономика. 2022. № 2. 281 с.
17. Buznik V.M. et al. Strengthening of ice with basalt materials // Cold Regions Science and Technology. 2022. T. 196. P. 103490.
18. 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.
19. 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](https://doi.org/10.1038/s41467-022-32633-1)
20. 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](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.04.002)
21. Коновалов С.В. Обзор физико-механических свойств льда // Вестник науки и образования. 2020. №11-1 (89). С. 34–39.
22. 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](https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2019.01.001)
23. 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. [Https://doi.org/10.5194/tc-16-1941-2022](https://doi.org/10.5194/tc-16-1941-2022)
24. 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;6(94):786-797. (In Russ.) doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797
25. Kuznetsov I.S., Sirotiuk V.V., Kuznetsova V.N. Methods for calculating the bearing capacity of ice crossings. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2024;4(98):606-617. (In Russ.) doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-4-606-617
26. Sirotiuk V.V., Sirotiuk V.V., Yakimenko O.V., Krasheninin 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.)
27. Godetsky S.V., Kokin O.V., Kuznetsova O.A., Tsvetinskaya 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.) doi.org/10.31857/S2076673421040108
28. Babaei H., Barrette P.D. A computational modeling basis in support of the Canadian winter road infrastructure. National Research Council Canada, 2020.
29. 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. [Https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103508](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103508)
30. 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. [Https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103925](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103925)
31. Leppäranta M. Mechanics of Lake Ice. Freezing of Lakes and the Evolution of their Ice Cover. Cham: Springer International Publishing, 2023: 159-203. [Https://doi.org/10.1007/978-3-031-25605-9_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-25605-9_5)
32. Ren D., Park J.-C. Particle-based numerical simulation of continuous ice-breaking process by an icebreaker. Ocean Engineering. 2023: 270. [Https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113478](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113478)
33. 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. [Https://doi.org/10.1139/cgj-2022-0464](https://doi.org/10.1139/cgj-2022-0464)
34. Ye L.Y. et al. Peridynamic solution for submarine surfacing through ice. Ships and Offshore Structures. 2020; T. 15. no. 5: 535-549. [Https://doi.org/10.1080/17445302.2019.1661626](https://doi.org/10.1080/17445302.2019.1661626)
35. 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. [Https://doi.org/10.3390/jmse12010188](https://doi.org/10.3390/jmse12010188)
36. Tugulan C.C. et al. Flexural-Gravity Waves Generated by Different Load Sizes and Configurations on Varying Ice Cover. Water Waves. 2024: 1-17. [Https://doi.org/10.1007/s42286-024-00083-5](https://doi.org/10.1007/s42286-024-00083-5)
37. Xie Q. Numerical modeling of the stress-strain state of the ice beam by specified constitutive model. Material Science, Engineering and Applications. 2022;

REFERENCES

1. Goncharova G.Y., Sirotiuk V.V., Yakimenko O.V., Orlov P.V., Dolgodvorov R.E. Loadbearing ca-

Vol. 2, No. 1: 1–8, Jun. 2022. [Https://doi.org/10.21595/msea.2022.22278](https://doi.org/10.21595/msea.2022.22278)

15. Yakimenko O.V., Sirotyuk V.V. Strengthening ice crossings with geosynthetic materials. Omsk, SibADI, 2015: 166. (In Russ.)
16. Syromyatnikova A.S. Perspektivy primenjenija ledjanyh kompozicionnyh materialov dlja stroite l'stavaledovyh pereprav [Prospects for the use of ice composite materials for the construction of ice crossings] Arktika: jekologijaijekonomika. 2022; 2: 281. (in Russ.)
17. Buznik V.M. et al. Strengthening of ice with basalt materials. *Cold Regions Science and Technology*. 2022; T. 196: 103490.
18. 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.
19. Weyhenmeyer G.A., Obertegger U., Rudebeck H. et al. Towards critical white ice conditions in lakes under global warming. *NatCommun.* 2022; 13, 4974. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32633-1>
20. 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
21. Konovalov S.V. Review of physical and mechanical properties of ice. *Vestnik nauki i obrazovanija*. 2020; 11-1 (89): 157-165. (In Russ.)
22. 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
23. 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. [Https://doi.org/10.5194/tc-16-1941-2022](https://doi.org/10.5194/tc-16-1941-2022)

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД СОАВТОРОВ

Кузнецов И.С. Обзор результатов предшествующих исследований. Выбор методологии и методов исследования. Разработка плана эксперимента и его реализация. Обработка полученных данных. Формулировка результатов и выводов (60 %).

Кузнецова В.Н. Формулирование проблемы, направления и темы исследования. Постановка задачи исследования. Руководство процессом разработки темы (40 %).

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Kuznetsov I.S. Review of previous research results, selection of research methodology and methods, development of an experimental plan and its implementation, processing of the obtained data, formulation of results and conclusions. (60 %).

Kuznetsova V.N. Defining the research area, topic and the research question, research design, setting the main objectives and monitoring the research process. (40 %).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Илья Сергеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6524-4976>,

SPIN-код: 6890-3069,

e-mail: ilyxa_kuznetsov@vk.com

Кузнецова Виктория Николаевна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Эксплуатация нефтегазовой и строительной техники» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ) (644050, г. Омск, пр. Мира, д. 5).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3546-0894>,

SPIN-код: 1039-7546,

e-mail: dissovetsibadi@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov Ilya S. – Associate Professor, the Department of Operation of Oil and Gas and Construction Equipment, Siberian State Automobile and Road University (SibADI) (5, ave. Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6524-4976>,

SPIN-code: 6890-3069,

e-mail: ilyxa_kuznetsov@vk.com

Kuznetsova Victoria N. – Dr. of Sci. (Eng.), Professor, Professor at the Department of Operation of Oil and Gas and Construction Equipment, Siberian State Automobile and Road University (SibADI) (5, ave. Mira, Omsk, 644050).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3546-0894>,

SPIN-код: 1039-7546,

e-mail: dissovetsibadi@bk.ru