

Научная статья
УДК 625.711
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797>
EDN: UTSJKO



ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЛЕДОВЫХ АВТОЗИМНИКОВ С ПОМОЩЬЮ АРМИРОВАНИЯ И МОДИФИКАЦИИ ЛЬДА

Г.Ю. Гончарова¹, В.В. Сиротюк^{2*}, О.В. Якименко², П.В. Орлов², Р.Е. Долгодворов³

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет),

г. Москва, Россия

²Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),

г. Омск, Россия

³ООО «Газпромнефть НТЦ»,

г. Тюмень, Россия

galinagoncharova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4270-819X>;

sirvv@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2254-8803>;

olgayakimenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5088-5519>;

orlov-pv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9363-0735>;

dolgodvorov.re@gazpromneft-ntc.ru

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Природные процессы, связанные с оттаиванием вечной мерзлоты, и сопутствующие им риски техногенных катастроф в последние годы неуклонно возрастают. Одновременно открывается новое пространство возможностей по развитию территорий, формированию новых маршрутов транспортировки грузов как транзитом, так и непосредственно в регионы Арктики. Возрастает количество потребителей, повышаются требования к экономической эффективности транспортной инфраструктуры и требования к материалам для ее строительства и содержания.

Материалы и методы. Водный лёд – одна из самых распространённых в северной природе субстанций, а опыт его использования в качестве строительного материала уходит вглубь веков. При этом применение водного льда до настоящего времени не имеет альтернативы при строительстве сезонных ледовых дорог и переправ, в том числе для решения задач нефтегазодобывающих компаний. Возможностям применения современных материалов, изменяющих свойства водного льда и конструктивно-технологических решений для увеличения грузоподъёмности и безопасности ледовых переправ и продления сроков эксплуатации автозимников, посвящена данная статья.

Результаты. Экспериментально-теоретические исследования, испытания на полигоне, опытно-производственные испытания на ледовых переправах показали возможность значительно повысить грузоподъёмность и безопасность движения транспорта при армировании льда. Введение модификаторов водного льда совместно с его армированием существенно улучшают физико-механические свойства водного льда.

Заключение. Изложено представление авторов о возможностях значительного увеличения несущей способности ледового покрова на автозимниках, безопасности движения транспорта, продления сроков их эксплуатации при комбинированном применении специальных армирующих материалов и химических модификаторов водного льда. Раскрыты причины ограниченного применения рекомендаций, предложенных авторами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Арктика, автозимники, ледовые переправы, повышение грузоподъёмности, армирование, модифицирующие соединения, структура льда, полимерные связующие

© Гончарова Г.Ю., Сиротюк В.В., Якименко О.В., Орлов П.В., Долгодворов Р.Е., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Статья поступила в редакцию 22.11.2023; одобрена после рецензирования 18.12.2023; принята к публикации 20.12.2023.

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: 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>

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797>

EDN: UTSJKO

LOAD-BEARING CAPACITY AND SAFETY FOR WINTER ROADS IMPROVEMENT USING REINFORCEMENT AND ICE MODIFICATION

Galina Y. Goncharova¹, Viktor V. Sirotiuk^{2*}, Olga V. Yakimenko², Pavel V. Orlov², Roman E. Dolgodvorov³

¹Bauman Moscow State Technical University (national Research University), Moscow, Russia

²Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

³ООО Gazpromneft STC, Tyumen, Russia

galinagoncharova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4270-819X>;

sirvv@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2254-8803>;

olgayakimenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5088-5519>;

orlov-pv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9363-0735>;

dolgodvorov.re@gazpromneft-ntc.ru

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. The natural processes associated with the thawing of permafrost and the accompanying risks of man-made disasters have been steadily increasing in recent years. At the same time, a new space of opportunities opens up for the development of territories, the formation of new cargo transportation routes, both in transit and directly to the Arctic regions. The number of consumers is increasing, the requirements for the economic efficiency of transport infrastructure and the requirements for materials for its construction and maintenance are increasing.

Materials and methods. Water ice is one of the most widespread substances in the northern nature, and the experience of its use as a building material goes back centuries. At the same time, the use of water ice still has no alternative in the construction of seasonal ice roads and crossings, including for solving the tasks of oil and gas companies. This article is devoted to the possibilities of using modern materials that change the properties of water ice and structural and technological solutions to increase the carrying capacity and safety of ice crossings and extend the service life of winter trucks.

Results. Experimental and theoretical studies, tests at the landfill, pilot production tests at ice crossings have shown the possibility to significantly increase the carrying capacity and safety of the transport when reinforcing ice. The introduction of water ice modifiers together with its reinforcement significantly improve the physical and mechanical properties of water ice.

Conclusion. The authors' idea of the possibilities of a significant increase in the bearing capacity of the ice cover on winter roads, traffic safety, prolongation of their service life with the combined use of special reinforcing materials and chemical modifiers of water ice is presented. The reasons for the limited use of the recommendations proposed by the authors are disclosed.

© Goncharova G. Y., Sirotiuk V. V., Yakimenko O. V., Orlov P. V., Dolgodvorov R. E., 2023



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

KEYWORDS: Arctic, winter trucks, ice crossings, lifting capacity, reinforcement, modifying compounds, ice structure, polymer binders

The article was submitted 22.11.2023; approved after reviewing 18.12.2023; accepted for publication 20.12.2023.

The 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. Galina Y. Goncharova, Viktor V. Sirotiuk, Olga V. Yakimenko, Pavel V. Orlov, Roman E. Dolgodvorov Load-bearing capacity and safety for winter roads improvement reinforcement and ice modification. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (6): 786-797. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797>

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. Их грузоподъёмность в первую очередь определяется толщиной и структурой льда, которая зависит от температуры воздуха и воды. ГОСТ Р 58948–2020¹ требует для пропуска через переправу машин массой 20 т толщину льда не менее 55–65 см, а массой 40 т – 75–100 см. Обычно продолжительность действия переправ составляет не более 2–4 месяцев.

В ближайшей перспективе альтернативы автозимникам и ледовым переправам не прослеживаются:

- 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.

Исследования сезонной эксплуатации ле-

довой дороги Оулу-Хайлуото (Финляндия) с 1974 по 2009 г. показали, что год от года наблюдается явный тренд более позднего начала допуска к движению транспорта (по допустимой национальными стандартами толщине льда), который составляет 0,67 дня/год, а ежегодная максимальная толщина льда снижается приблизительно на 0,55 см/год [1]. Возрастание влияния изменения климатических условий на зимние дороги в первую очередь относится к ледовым переправам как к «слабейшим» звеньям автомобильных зимников [2].

Поэтому дальнейшее развитие сети временных дорог, ледовых автозимников и переправ с повышением их грузоподъёмности, безопасности и сроков функционирования является актуальной задачей.

Цель данной публикации: ознакомление научной общественности и специалистов дорожной отрасли с результатами и направлениями исследований учёных МГТУ им. Н.Э. Баумана и СибАДИ по проблеме повышения несущей способности и безопасности ледовых автозимников.

Сама идея усиления ледовых переправ и автозимников не нова. Со времён освоения Сибири и организации почтовой службы в России «приписные» крестьяне пытались усиливать ледяные пороги по рекам хворостом, жердями, брёвнами, досками; «сохраняли» лёд, покрывая его соломой, опилками и т.п.

Вопросы физико-механических свойств льда, проблемы расчета ледяного покрова и увеличения его грузоподъёмности изучаются более 100 лет. Этим вопросам посвящены работы Г.А. Авсюка, С.А. Арцыбашева, С.А. Бернштейна, Г.Р. Брегмана, И.П. Бутягина, Н.Н. Бычковского, В.М. Бузника, Б.П. Вейнберга, К.Ф. Войтковского, С.С. Голушкевича, Г.Ю. Гончаровой, А.Д. Дмитриева, А.М. Елистратовой, Н.Н. Зубова, Б.Д. Кар-

¹ ГОСТ Р 58948–2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Дороги автомобильные зимние и ледовые переправы. Технические правила устройства и содержания». Дата введения 2020-11-01.

ташкина, С.В. Изюмова, К.Н. Коржавина, М.М. Корунова, А.Н. Крылова, С.В. Крылова, Б.Г. Коренева, Г.Л. Кузуба, А.М. Кулижникова, В.В. Лаврова, П.И. Лебедева, Б.В. Прокуракова, Д.В. Панфилова, В.Н. Пинегана, И.С. Песчанского, Б.А. Савельева, В.В. Сиротюка, Д.Е. Хейсина, А.Ф. Хренова, П.А. Шуйского, О.В. Якименко, Г.Н. Яковлева и многих других.

Вопросам усиления ледового покрова посвящены десятки изобретений и патентов. В настоящее время рассматриваемым вопросам посвящены публикации зарубежных авторов, например [3, 4, 5, 6].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На рисунке 1 представлена классификация способов увеличения несущей способности ледового покрова и продления сроков эксплуатации переправ.

В настоящее время появились новые материалы, методы и конструктивно-тех-

нологические решения в области ледовых технологий. Тем не менее стандарт РФ – ГОСТ Р 58948–2020² рекомендует только два старинных метода усиления ледовых переправ: искусственное намораживание льда и устройство деревянных настилов из брёвен и досок.

Одним из относительно новых конструктивно-технологических решений, повышающих грузоподъёмность и безопасность ледовых автозимников, является метод армирования ледяного покрова геосинтетическими материалами [7, 8, 9]. Суть его заключается во вмораживании в ледовый покров по мере его формирования специальных геосеток и георешеток. Армирующие материалы воспринимают растягивающие напряжения, возникающие в ледяном покрове от воздействия транспортных и термических нагрузок.

Кроме экспериментально-теоретических исследований (рисунок 2) проведены испытания армированного ледового покрова на полигоне (рисунки 3,4, 5).



Рисунок 1 – Классификация способов увеличения несущей способности ледового покрова и продления сроков эксплуатации переправ
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Classification of ways to increase the bearing capacity of the ice cover and extend the service life of crossings
Source: compiled by the authors.

² ГОСТ Р 58948–2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Дороги автомобильные зимние и ледовые переправы. Технические правила устройства и содержания». Дата введения 2020-11-01.

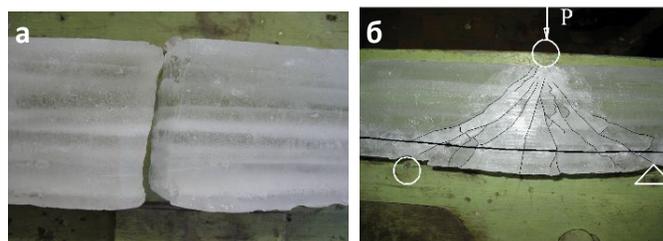


Рисунок 2 – Характер разрушения:
 а – неармированный образец; б – армированный образец
 Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Nature of destruction: a – non-reinforced sample; b – reinforced sample
 Source: compiled by the authors.

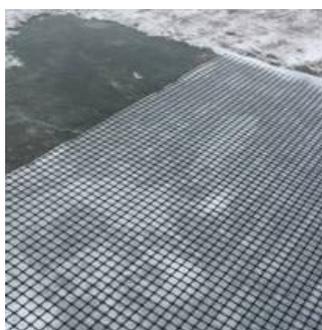


Рисунок 3 – Укладка геокомпозита (геосетка + геотекстиль)
 и поливка участка водой для намораживания льда («верхнее» армирование)
 Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Laying geocomposite (geogrid + geotextile)
 and watering the site with water for freezing ice ("upper" reinforcement)
 Source: compiled by the authors.



Рисунок 4 – Погружение геокомпозита в «лайну» и протаскивание его подо льдом
 капроновыми тросами («нижнее» армирование)
 Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Immersion of the geocomposite in the 'lane' and dragging
 it under the ice with nylon cables ('lower' reinforcement)
 Source: compiled by the authors.



Рисунок 5 – Испытание опытного участка на полигоне колесной и гусеничной техникой
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Testing of the pilot site at the landfill with wheeled and tracked vehicles
Source: compiled by the authors.

Осуществлено строительство и испытания армированных участков ледовых переправ

на р. Иртыш в Омской обл. (рисунок 6) и на р. Пеза (Архангельская обл.).



Рисунок 6 – Укладка геосинтетики зимой и извлечение её весной
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Laying geosynthetics in winter and extracting it in spring
Source: compiled by the authors.

На основании полного цикла испытаний и анализа полученных результатов предложена уточнённая формула для определения требуемой толщины армированного ледового покрова h (см) для данной нагрузки P (т)

$$h = 11n\sqrt{P}/K_{арм}$$

где n - коэффициент, учитывающий интенсивность движения (см. таблицу В.1 ГОСТ Р 58948–2020); $K_{арм}$ – коэффициент, учитывающий наличие армирующей прослойки (таблица).

Таблица
Значение коэффициента армирования $K_{арм}$
Источник: составлено авторами

Table
The value of the reinforcement coefficient $K_{арм}$
Source: compiled by the authors

Прочность геосетки (георешётки), кН/м	Относительная деформация при разрыве, %, не более	$K_{арм}$ при верхнем/нижнем армировании
20	3	1,10/1,15
	8	1,05/1,10
60	3	1,20/1,30
	8	1,15/1,20
100	3	1,30/1,50
	8	1,25/1,40

Если принять, что требуемая толщина неармированного льда для нагрузки 40 т составляет примерно 60 см (см. таблицу 12 ГОСТ Р 58948–2020), то посредством армирования эта толщина может уменьшиться до 40 см. За сутки зимой толщина ледяного покрова может увеличиваться примерно на 2 см. Следовательно, армированную переправу можно вводить в эксплуатацию на 10 суток раньше, а закрывать на 5-10 суток позднее.

Значительные изменения природных прочностных и деформативных свойств водного льда даёт применение композиционных методов³ [10, 11]. Для усиления несущей способности ледового покрытия предлагается одновременно вносить в микродозах модифицирующие соединения и армирующие элементы нового поколения.

Использованию водного льда в качестве удобного доступного и полноценного материала препятствуют его недостаточная прочность и высокая хрупкость. Функциональное назначение ледовых модификаторов – это снижение хрупкости ледовой матрицы за счёт создания демпфирующей прослойки в межкристаллическом пространстве, купирование возникающих трещин и усиление адгезии к армирующим элементам. Выбор армирующих элементов должен производиться в соответствии с современными критериями, разработанными с позиций сопряжения физико-механических

свойств льда и армирующих материалов. По результатам экспериментальных исследований совместное использование обоих механизмов воздействия на свойства ледового композита приводит к эффекту, превышающему сумму воздействий модификации и армирования по отдельности [12, 13]. Оптимальный выбор состава и концентраций вводимых в лёд модификаторов, а также структуры и конфигурации армирующих элементов открывает принципиально новые возможности для использования водного льда в качестве полноценного строительного материала для северных регионов.

В настоящей статье представлены два наиболее перспективных направления, получивших активное развитие изначально в сфере ледовых технологий для спорта высших достижений, а затем и для решения широкого круга задач Арктического региона. Речь идет о модификации свойств ледовых массивов внесением в воду для заливки льда микродоз высокомолекулярных соединений различного функционального назначения.

При кристаллизации разливаемой жидкости искусственно внесённые соединения локализируются в межкристаллическом пространстве и играют роль демпфера между кристаллами, снижая интенсивность межкристаллических взаимодействий (рисунок 7).

³ Гончарова Г.Ю. [и др.] Лед как материал для Арктики // Сборник докладов конференции «Материалы для технических устройств и конструкций, применяемых в Арктике» (Москва, 26 ноября 2015 г.). М.: ФГУП ВИАМ, 2015. 17 с.

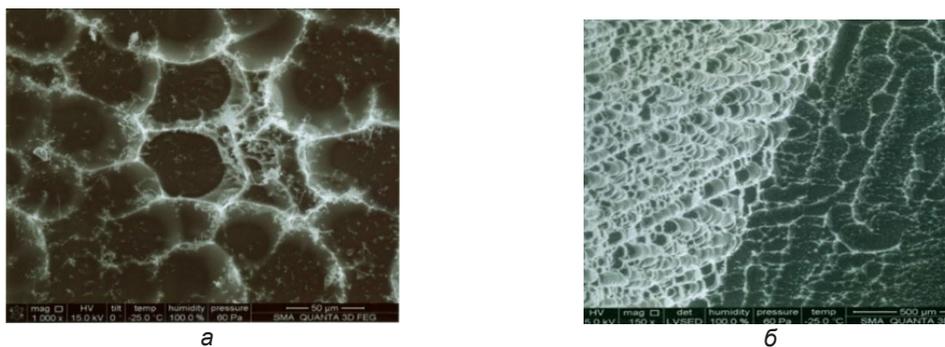


Рисунок 7 – Криомикроскопическое изображение модифицированного льда: а – вид сверху; б – вид сверху и боковой скол
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Cryomicroscopic image of modified ice: top view (a), top view and side chip (b)
Source: compiled by the authors.

Как показали исследования последних лет, наиболее эффективно использование модифицирующих соединений одновременно с армированием ледовых структур различными материалами, отобранными в соответствии с разработанными нами критериями, учитывающими возможность их сопряжения с ледовой матрицей и создания композиционного материала со свойствами, существенно отличающимися от естественного льда.

Теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия ледовой матри-

цы с вносимыми упрочняющими материалами показали, что собственная прочность вносимых элементов является далеко не исчерпывающим показателем. Повышенная жёсткость вмораживаемых конструкций не укрепляет ледовое покрытие, а, наоборот, препятствует формированию композиционного материала и провоцирует образование новых концентраторов напряжений и хрупкое разрушение композита (рисунок 8).



Рисунок 8 – Особенности разрушения армированного льда:
а – образцы льда, армированные жёсткими металлоконструкциями;
б – хрупкое разрушение образцов, армированных металлической проволокой
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Features of reinforced ice destruction:
Ice samples reinforced with rigid metal structures (a),
brittle destruction of samples reinforced with metal wire (b)
Source: compiled by the authors.

Только оптимальное соотношение механических свойств модифицированного льда и армирующих элементов даёт максимальный эффект для композита.

В соответствии с предложенными критериями на первый план выходят и такие свойства материалов, как максимальная адгезия к ледовой матрице, сопряжение физико-механических характеристик (коэффициентов линейного и объёмного расширения), а также максимальное отношение смоченной площади армирующих элементов к их суммарной массе. Последнее соображение особенно актуально как фактор компактности и снижения

суммарного веса армирующих материалов при их транспортировке к месту использования.

Таким образом, можно говорить о смещении вектора в разработке новых упрочнённых композиционных материалов на основе водного льда в сторону волоконных материалов, особенно имеющих фибриллярную структуру. Прочностные характеристики ледовых образцов, изготовленных с использованием модификаторов и армирования, обладают большей прочностью как на растяжение при изгибе, так и на сжатие (рисунок 9).

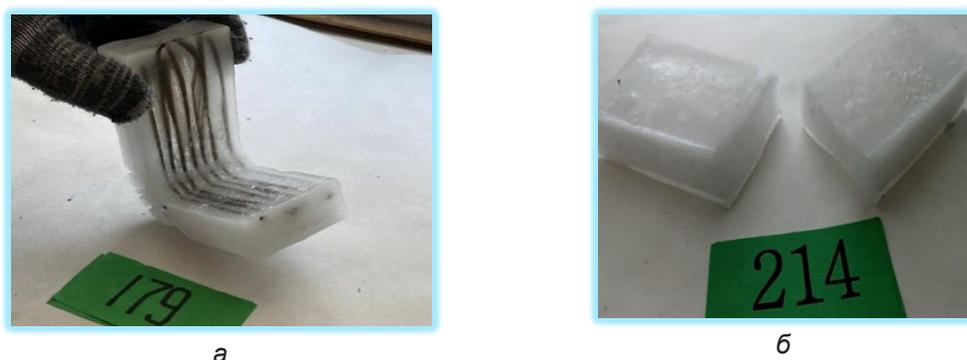


Рисунок 9 – Разрушение модифицированного и чистого льда:
 а – деформация и пластическое разрушение модифицированного и армированного ледового образца;
 б – хрупкое разрушение ледового образца из чистой воды
 Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Destruction of modified and pure ice:
 Deformation and plastic destruction of a modified and reinforced ice sample (a),
 brittle destruction of an ice sample from pure water (b)
 Source: compiled by the authors.

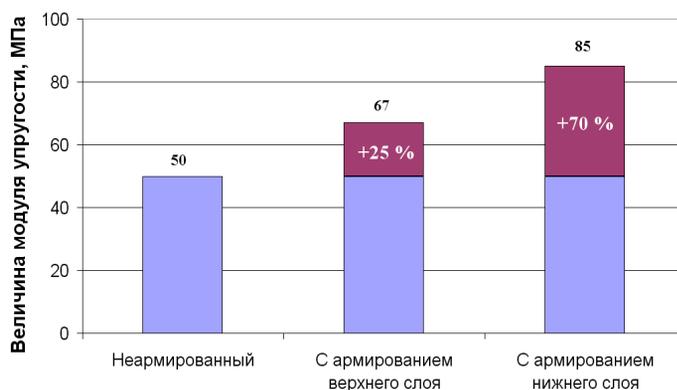


Рисунок 10 – Результаты испытаний на опытных участках
 Источник: составлено авторами.

Figure 10 – Test results at experimental sites
 Source: compiled by the authors.

При этом требуется большая величина работы для их разрушения по сравнению с образцами из чистой воды.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Обобщение результатов испытаний на полигоне и реальной переправе показало существенное (от 25 до 70%) увеличение грузоподъёмности ледового покрова, армированного специальной геосеткой и георешёткой (рисунок 10) и отсутствие раскрытых температурных трещин на нём.

Аналогичные положительные результаты были получены и при армировании ледового покрова на р. Пеза (Архангельская обл.).

При этом «нижнее армирование» обеспечивает расположение арматуры в зоне, наиболее подверженной растягивающим напряжениям от транспортной нагрузки. «Верхнее» – в наибольшей степени воспринимает и компенсирует термические напряжения, препятствуя образованию трещин.

При использовании модификаторов льда его механические свойства существенно улучшаются. Значительно возрастает и позитивный эффект при совместном использовании армирования ледового покрытия. Следует отметить, что рекомендуемые авторами материалы, являясь экологически нейтральными, позволяют армировать и структурировать ледовые покрытия, обладающие требуемым комплексом физико-механических свойств.

После проведения полного цикла испытаний на полигонах и опытных участках будут установлены математические зависимости, позволяющие достоверно регламентировать требуемую толщину ледового покрова при композитном армировании.

На основании изложенного можно предположить, что ледовые переправы могут быть открыты при существенно меньшей толщине льда (чем требуется по ГОСТ Р 58948–2020) и эксплуатироваться более длительное время. При этом даже при значительной деформации они сохраняют несущую способность, обеспечивая тем самым безопасность движения по такому льду (защита от провалов автомобилей на переправах), что нехарактерно для природного льда и чрезвычайно актуально при формировании ледовых переправ.

ВЫВОДЫ

1. Строительству ледовых автозимников в северных, малообжитых регионах РФ пока нет альтернативы. При этом становится всё более актуальным увеличение грузоподъёмности и безопасности ледовых дорог.

2. Основной документ, нормирующий все вопросы по проектированию, строительству и содержанию ледовых автозимников (ГОСТ Р 58948–2020), предлагает конструктивно-технологические решения и материалы, не учитывают современные научные достижения в области улучшения физико-механических свойств льда, не позволяют в полной мере решать проблему повышения их грузоподъёмности, продления сроков эксплуатации переправ и обеспечения их безопасности.

3. Целесообразность применения армирующих лёд некоторых видов геосеток и плоских георешёток для увеличения грузоподъёмности и безопасности ледовых автозимников доказана многолетними экспериментально-теоретическими исследованиями, испытаниями на полигоне и на двухэксплуатируемых ледовых переправах. Однако эти конструктивно-технологические решения не могут найти широкого применения ввиду отсутствия соответствующей нормативной базы и методики технико-экономического обоснования целесообразности дополнительных затрат на усиление ледовых автозимников.

4. Исследования по применению модифицирующих добавок для уменьшения хрупкости и повышения прочности водяного льда, а также комбинация модификаторов и некоторых армирующих элементов дают обнадеживающие результаты. Эти исследования необходимо продолжить: апробировать результаты лабораторных исследований на полигонах, а также проработать вопросы практического применения и технологичности предлагаемых способов улучшения физико-механических свойств водного льда непосредственно на ледовых переправах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kiani S. et al. Effects of recent temperature variability and warming on the Oulu-Hailuoto ice road season in the northern Baltic Sea // *Cold Regions Science and Technology*. 2018. Т. 151. Р. 1-8.
2. Barrette P.D., Charlebois L., Butt B. Reinforcement of ice covers for transportation: Material investigation and preliminary laboratory testing. – National Research Council Canada= Conseil national de recherches Canada, 2019.
3. Thompson Towell K.L. et al. Construction and structural analysis of an arched cellulose reinforced ice bridge for transportation infrastructure in cold regions // *Cold Reg. Sci. Technol.* Elsevier, 2022. Vol. 198. P. 103508.
4. Pronk A. et al. The 2017–18 design and construction of ice composite structures in Harbin // *Structures*. Elsevier, 2019. Vol. 18. P. 117–127.

5. Lou X., Wu Y. Influence of temperature and fiber content on direct shear properties of plain ice and fiber-reinforced ice // *Cold Reg. Sci. Technol.* Elsevier, 2022. Vol. 194. P. 103458.

6. Timco G.W., Weeks W.F. A review of the engineering properties of sea ice // *Cold Reg. Sci. Technol.* Elsevier, 2010. Vol. 60, № 2. P. 107–129.

7. Якименко О.В., Матвеев С.А., Сиротюк В.В. Исследование напряженного состояния и расчёт несущей способности армированной ледяной плиты // *Вестник СибАДИ.* 2014. 3(37). С.63–67.

8. Якименко О.В., Сиротюк В.В. Усиление ледовых переправ геосинтетическими материалами: монография. Омск: СибАДИ, 2015. 168 с. 1 эл. опт. диск (CD-ROM): ил., табл. Библиогр.: С. 160–168. Реж. доступа: <http://bek.sibadi.org/fulltext/ESD56.pdf>

9. Якименко О.В., Сиротюк В. В. Опыт армирования ледового покрова на переправах с помощью геосинтетических материалов // *Криосфера Земли.* 2016. Т. 20, № 3. С. 86–94.

10. Сыромятникова А. С. Перспективы применения ледяных композиционных материалов для строительства ледовых переправ // *Арктика: экология и экономика.* 2022. №. 2. 281 с.

11. Vasiliev N.K. et al. A review on the development of reinforced ice for use as a building material in cold regions // *Cold Regions Science and Technology.* 2015. T. 115. С. 56-63.

12. Buznik V.M. et al. Strengthening of ice with basalt materials // *Cold Regions Science and Technology.* 2022. T. 196. P. 103490.

13. Buznik V.M. et al. Experimental study of the impact of crystallization parameters on properties of modified and reinforced ice structures intended for sports facilities and the Arctic // *Proceedings of the 25th IIR International Congress of Refrigeration (Montreal, August 24-30, 2019).* Montreal, Quebec, Canada: IIR, 2019. P. 1110-1117.

REFERENCES

1. Kiani S. et al. Effects of recent temperature variability and warming on the Oulu-Hailuoto ice road season in the northern Baltic Sea. *Cold Regions Science and Technology.* 2018; T. 151: 1-8.

2. Barrette P.D., Charlebois L., Butt B. Reinforcement of ice covers for transportation: Material investigation and preliminary laboratory testing. *National Research Council Canada=Conseil national de recherches.* Canada, 2019.

3. Thompson Towell K.L. et al. Construction and structural analysis of an arched cellulose reinforced ice bridge for transportation infrastructure in cold regions. *Cold Reg. Sci. Technol.* Elsevier; 2022. Vol. 198: 103508.

4. Pronk A. et al. The 2017–18 design and construction of ice composite structures in Harbin. *Structures.* Elsevier. 2019; Vol. 18: 117–127.

5. Lou X., Wu Y. Influence of temperature and fiber content on direct shear properties of plain ice and fiber-reinforced ice. *Cold Reg. Sci. Technol.* Elsevier, 2022; Vol. 194: 103458.

6. Timco G.W., Weeks W.F. A review of the engineering properties of sea ice. *Cold Reg. Sci. Technol.* Elsevier, 2010; Vol. 60, № 2: 107–129.

7. Yakimenko O.V. Matveev S.A., Sirotyuk V.V. Issledovanie naprjazhennogo sostojaniya i raschjot nesushhej sposobnosti armi-rovannoj ledjanoj plity [Investigation of the stress state and calculation of the load-bearing method-news of the reinforced ice plate]. *Vestnik SibADI.* 2014; 3(37): 63-67. (In Russ.)

8. Yakimenko O.V. Sirotyuk V.V. *Usilenie ledovyh pereprav geosinteticheskimi materialami* [Strengthening of ice crossings with geosynthetic materials]: monografija. Omsk: SibADI, 2015: 168. (in Russ.) – 1 jel. opt. disk (CD-ROM): il., tabl. – Bibliogr.: pp. 160-168. Available at: <http://bek.sibadi.org/fulltext/ESD56.pdf>

9. Yakimenko O.V. Sirotyuk V.V. Opyt armirovaniya ledovogo pokrova na perepravah s pomoshh'ju geosinteticheskikh materialov [The experience of ice cover formation at crossings using geosynthetic materials]. *Kriosfera Zemli.* 2016; T. XX, № 3: 86-94. (in Russ.)

10. Syromjatnikova A. S. Perspektivy primenenija ledjanyh kompozicionnyh materialov dlja stroitel'stva ledovyh pereprav [Prospects for the use of ice composite materials for the construction of ice crossings] *Arktika: jekologija i jekonomika.* 2022; 2: 281. (in Russ.)

11. Vasiliev N.K. et al. A review on the development of reinforced ice for use as a building material in cold regions. *Cold Regions Science and Technology.* 2015; T. 115: 56-63.

12. Buznik V.M. et al. Strengthening of ice with basalt materials. *Cold Regions Science and Technology.* 2022; T. 196: 103490.

13. Buznik V.M. et al. Experimental study of the impact of crystallization parameters on properties of modified and reinforced ice structures intended for sports facilities and the Arctic. *Proceedings of the 25th IIR International Congress of Refrigeration (Montreal, August 24-30, 2019).* Montreal, Quebec, Canada: IIR, 2019: 1110-1117.

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Гончарова Г.Ю. *Общее руководство исследованиями, написание статьи.*

Сиротюк В.В. *Общее руководство исследованиями, написание статьи.*

Якименко О.В. *Выполнение исследований, редактирование статьи.*

Орлов П.В. *Постановка цели, задач, координация исследований, участие в написании статьи.*

Долгодворов Р.Е. *Руководство опытно-производственными испытаниями.*

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Galina YI. Goncharova. *General research management, writing an article.*

Viktor V. Sirotyuk. *General research management, writing an article.*

Olga V. Yakimenko. *Performing research, editing the article.*

Pavel V. Orlov. *Purposes and tasks statement, research coordination, participation in writing the article.*

Roman E. Dolgodvorov. *Pilot production tests management.*

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Гончарова Галина Юрьевна – проф., д-р техн. наук.

Сиротюк Виктор Владимирович – проф., д-р техн. наук, SPIN-код: 2583-7458.

Якименко Ольга Владимировна – доц., канд. техн. наук, SPIN-код: 9788-5596.

Орлов Павел Викторович – начальник научно-исследовательского отдела, канд. техн. наук, SPIN-код: 2413-6194.

Долгодворов Роман Евгеньевич – руководитель по разработке проектов ООО «Газпромнефть НТЦ».

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galina Y. Goncharova – Professor, Dr. of Sci.

Viktor V. Sirotiuk –Professor, Dr. of Sci., SPIN-код: 2583-7458.

Olga V. Yakimenko –Associate Professor, Cand. of Sci., SPIN-код: 9788-5596.

Pavel V. Orlov – Head of the Research Department, Cand. of Sci., SPIN-код: 2413-6194.

Roman E. Dolgodvorov – development project manager, ООО Gazpromneft STC.