ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ/HYDRAULIC ENGINEERING, HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.10

УСИЛЕНИЕ ЛЬДА В ГИДРОТЕХНИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Научная статья

Андреева С.А.[1], Шарапов Д.А.[2,] *
[2] ORCID : 0000-0001-8650-2375;
[1] Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (sharapov.dm[at]gmail.com)

Аннотация

Активное развитие композитных материалов стало важным направлением в современной науке и инженерии; в области строительства и создания сооружений в экстремальных климатических условиях, таких как ледяные регионы, композитные материалы с ледяной матрицей приобретают все большую значимость. В работе рассматривается применение композитов с армирующими волокнами в ледяных матрицах для повышения прочностных характеристик ледяных конструкций. Исследования показывают, что волокнистые композиции, где волокна выполняют роль армирующего элемента, способны существенно улучшить механические свойства льда. Эффективное взаимодействие между матрицей и волокнами обеспечивает высокую прочность и жесткость композитных материалов, а также позволяет контролировать пластичность разрушения. Особое внимание уделяется определению оптимальных параметров армирующих волокон и матрицы, а также исследованию их взаимодействия при различных условиях нагружения и температурных изменениях. Использование таких материалов может найти применение в областях, требующих высокой прочности и устойчивости. Оптимизация параметров композитов и их дальнейшее развитие обещают внести существенный вклад в область инженерных технологий для экстремальных климатических условий.

Ключевые слова: усиление льда, восстановление причалов, армирование льда, гидротехническое строительство.

ICE REINFORCEMENT IN HYDRAULIC ENGINEERING

Research article

Andreeva S.A.[1], Sharapov D.A.[2,] *
[2] ORCID : 0000-0001-8650-2375;
[1] Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russian Federation
[2] Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (sharapov.dm[at]gmail.com)

Abstract

Active development of composite materials has become an important direction in modern science and engineering; in the field of construction and creation of structures in extreme climatic conditions, such as ice regions, composites with ice matrix are becoming increasingly important. This work examines the application of composites with reinforcing fibres in ice matrices to improve the strength performance of ice structures. Studies show that fibre composites, where fibres act as a reinforcing element, can significantly improve the mechanical properties of ice. The effective interaction between the matrix and fibres provides high strength and stiffness of the composites and also allows to control the fracture ductility. Special attention is paid to the determination of optimal parameters of reinforcing fibres and matrix, as well as the study of their interaction under different loading conditions and temperature changes. The use of such materials can find application in areas requiring high strength and stability. Optimization of composite parameters and their further development promises to make a significant contribution to the field of engineering technologies for extreme climatic conditions.

Keywords: ice reinforcement, berth restoration, ice reinforcement, hydraulic engineering construction.

Введение

В современной науке и технике одной из наиболее важных областей, привлекающих внимание исследователей и инженеров, является разработка и создание инновационных материалов с улучшенными характеристиками. Среди таких материалов особое внимание уделяется композитным материалам, которые открывают новые перспективы в области материаловедения и инженерии. Композиты представляют собой структуры, состоящие из двух или более компонентов, объединенных таким образом, чтобы обеспечить оптимальное сочетание их свойств. Одним из современных трендов в развитии композитных материалов является их применение в создании конструкций и сооружений, особенно в условиях экстремальных климатических условий, таких как арктические регионы. Особенно актуальным становится исследование и разработка композитных материалов с ледяной матрицей, которые могут быть использованы для строительства и укрепления ледовых сооружений. Одной из ключевых задач при создании сооружений изо льда является повышение прочности материала, а также обеспечение его стабильности при изменяющихся температурных условиях [1]. Использование композитных материалов с ледяной матрицей представляет собой перспективный подход. Такие композиты обладают высокой прочностью при сохранении определенной степени пластичности разрушения. Это достигается благодаря тому, что трещины, возникающие в

ледяной матрице, находят преграду в виде армирующих элементов, таких как волокна или наполнители, и не могут свободно распространяться. Свойства композитных материалов определяются характеристиками как матрицы, так и армирующих элементов. Волокнистые композиции, где волокна выполняют роль армирующего элемента, являются наиболее распространенным видом композитов. Эти материалы обладают высокой прочностью и жесткостью благодаря взаимодействию между матрицей и волокнами. Физические свойства таких композитов могут быть описаны с помощью коэффициентов, которые учитывают соотношение между матрицей и армирующими элементами. Проведенные исследования показывают, что применение армирующих материалов в виде коротких или непрерывных волокон позволяет значительно улучшить характеристики ледяных композитов. Важно подбирать оптимальное соотношение между свойствами матрицы и армирующего элемента, чтобы достичь наилучших результатов. Современные методы и технологии позволяют проводить эксперименты и оптимизировать параметры композитных материалов, что способствует развитию инновационных решений для строительства в условиях ледовых областей. Важно отметить, что применение композитных материалов с ледяной матрицей имеет перспективы в строительстве ледовых сооружений разной направленности (морская инфраструктура, спортивные сооружения, исследования в полярных регионах и др.). Исследования в области композитных материалов с ледяной матрицей позволяют нам более глубоко понять физические и механические особенности таких материалов, а также определить оптимальные параметры для достижения желаемых характеристик [2]. Продолжение исследований и разработок в этой области обещает принести новые инновации и решения для строительства и эксплуатации сооружений в условиях Арктики.

Методы и зависимости

Одним из перспективных направлений в материаловедении является создание композитных материалов. Для таких материалов удается существенно повысить некоторые прочностные характеристики, причем это увеличение прочности может оказаться больше, чем прочность элементов, составляющих композицию.

При создании сооружений изо льда важным является повышение прочности льда, снижение его зависимости от температуры и обеспечение сохранности ледяной конструкции [3]. Эти проблемы могут решаться благодаря применению композитных материалов с ледяной матрицей. В композитных материалах удается добиться относительно высокой прочности при сохранении достаточной вязкости разрушения. Это происходит за счет того, что трещины, возникающие в матрице, встречают препятствия для своего развития на границах матрица – волокно.

Из теории композитных материалов известно, что их прочность во много определяется величиной площади поверхности раздела между наполнителем и матрицей, а также силами сцепления в плоскости контакта. Величину этих сил определяют, задавая деформацию сдвига между поверхностью и льдом. На величину сил сцепления существенное влияние оказывают температура, шероховатость наполнителя и соленость льда. Увеличение шероховатости и уменьшение температуры и солености приводят к возрастанию сил сцепления.

В качестве матрицы рассматриваются как микроэлементы, так и макроэлементы. К микроэлементам относятся: песок, стекловолокно, опилки и прочее. К макроэлементам относятся: геосетка, геотекстиль [4].

Механические свойства композита могут быть описаны с помощью свойств наполнителя и матрицы. Например, предел пластичности на сдвиг всего композита может быть рассчитан по формуле [5]:

$$\tau = (\tau_m/(1+2C/3))[5\tau_s C/(3\tau_m) + (1-C)\sqrt{1+2C(1-\tau_s^2/\tau_m^2)/3}] \quad (1)$$

где τ_m – предел пластичности на сдвиг матрица (льда);

τ_s – предел пластичности на сдвиг армирующей добавки;

$C = V_1/V$, V_1 – объем включений;

V – объем всей системы.

Если считать, что армирующая добавка не деформируется, то расчетная формула упрощается:

$$\tau_k = \tau_m/\sqrt{1+3C/2} \quad (2)$$

Наиболее часто используют волокнистые композиции, которые представляют собой системы, состоящие из набора чередующихся двумерных армирующих элементов в виде пластичных материалов. В таких композициях упрочняющими материалами служат волокна, а матрица является средой, передающей нагрузку на волокна. Границы раздела между зернами матрицы и волокнами определяют прочность всей системы. Для описания их влияния вводится коэффициент ξ , отражающий отношение поверхности волокон в единице объема композита к поверхности зерен в матрице в том же объеме [5]:

$$\xi = S_k/S_i \quad (3)$$

где S_k – площадь поверхности волокон в единице объема;

S_i – площадь поверхности ледяных зерен матрицы.

Влияние этого коэффициента на прочность системы описывается выражением:

$$\sigma = \tilde{\sigma}|_{S_k=S_i} + K(\xi - 1) \quad (4)$$

где K – коэффициент размерности, Па, учитывающий силы смерзания волокна со льдом.

Армирование льда осуществляется короткими или непрерывными волокнами. При использовании коротких волокон их длину необходимо выбирать из следующего соотношения:

$$l_c \geq (\sigma_c D)/(2\tau_m) \quad (5)$$

где D – диаметр волокна;

σ_s – его прочность на разрыв.

В этом случае напряжения, возникающие в волокне, сравнимы с напряжениями в волокне бесконечной длины.

При армировании льда непрерывными волокнами прочность композита может быть определена из уравнения:

$$\sigma_k = V_s\bar{\sigma_s} + V_m\bar{\sigma_m} \quad (6)$$

где $\bar{\sigma_s}$, $\bar{\sigma_m}$ – средние значения прочности волокон и матрицы;

V_s , V_m – объемные доли волокон и матрицы соответственно.

При армировании волокнами обычно стремятся к тому, чтобы прочность композита превышала прочность льда без армирующих элементов σ_1 :

$$\sigma_k = V_s\bar{\sigma_s} + (1 - V_s)\bar{\sigma_m} \geq \sigma_1 \quad (7)$$

Из этого уравнения можно найти объемную критическую долю наполнителя, при которой происходит увеличение прочности композита по сравнению с матрицей:

$$V_s = (\sigma_1 - \bar{\sigma_m})/(\bar{\sigma_s} - \bar{\sigma_m}) \quad (8)$$

Из этой формулы следует, что объемная доля армирующих добавок уменьшается при возрастании средней прочности волокон по сравнению со средней прочность матрицы.

Канадские исследователи нашли соотношение для прочности ледяной композиции [6]:

$$\sigma_k/\sigma_m = V_sE_s/E_m \quad (9)$$

где E_s , E_m – модули нормальной упругости волокна и матрицы.

Из этого уравнения следует, что модуль упругости армирующего волокна должен быть больше, чем у ледяной матрицы. Например, модуль нормальной упругости стекловолокна превышает модуль ледяной матрицы в 30 раз, а модуль волокна только в 5-8 раз. Величину σ_k/σ_m называют коэффициентом упрочнения. На рис. 1 представлены теоретические зависимости коэффициента упрочнения от соотношения модулей нормальной упругости.

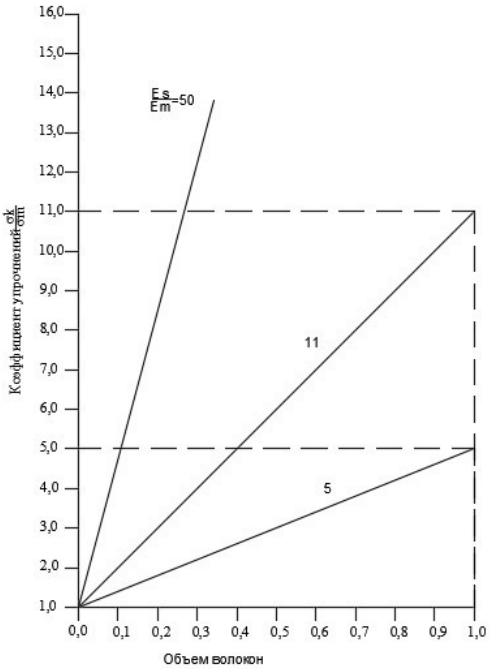

Рисунок 1 - Влияние отношения модулей упругости и объема наполнителя на прочность композита

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.10.1

Были проведены многочисленные экспериментальные исследования по армированию льда различными материалами [7], [8], [9], [10]. Например, изучалось армирования льда древесными опилками. Размеры волокон достигали 5 мм. Древесное волокно легко разводится водой, образуя суспензию, из которой намораживается лед. Результаты исследований показали, что прочность на изгиб такого материала зависит от процентного содержания в нем древесного волокна. Такой лед называли «ледопласт» [11].

Наилучшие результаты получаются при разведении в замораживаемой воде 5-7% массы древесного волокна. При этом значение прочности ледопласта на изгиб превышает в 2,5-3 раза прочность пресного льда при той же температуре, прочность на сжатие в 3-4 раза больше, чем у пресного льда.

Установлено, что пластические деформации развиваются в пресном льду в несколько раз быстрее, чем в ледопласте [12]. Его ползучесть под влиянием длительно действующих напряжений в несколько раз меньше, чем у чистого поликристаллического льда, и уменьшается с понижением температуры.

Ранее были приведены исследований прочности ледяных композитов на изгиб [5], [13]. Результаты представлены на рис. 2.

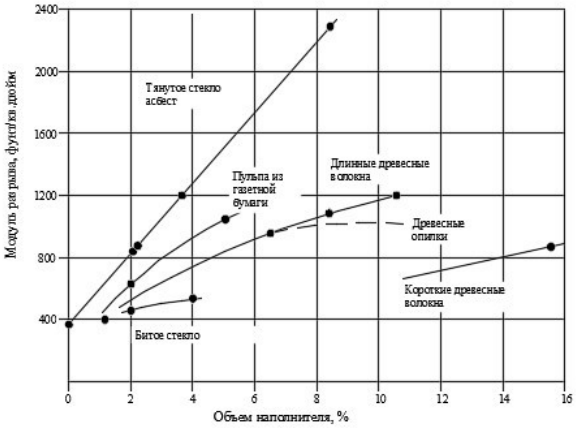

Рисунок 2 - Зависимость прочности армированного льда от типа и объема наполнителя
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.10.2

В результате исследований были получены формулы в виде эмпирических зависимостях:
при армировании стекловолокном

$$\sigma_f^k = 1.4(1 + 0.07|T|) + 0.29|T|^{0.63}\Phi l/d, l \leq 25mm \quad (10)$$

при армировании древесными опилками

$$\sigma_f^k = 1.4(1 + 0.07|T|) + 0.36|T|^{0.63}\Phi l/d, l \leq 10mm \quad (11)$$

где $\Phi = \rho_s f/(f(\rho_s - \rho_m))$;

l, d – длина и диаметр волокна;

ρ_s, ρ_m – плотности армирующих волокон и ледяной матрицы;

f – весовая доля армирующей фазы.

Другое направление в изучении армирования льда отталкивается от хорошо разработанного научного направления – механики мерзлых грунтов. Последователи этого направления предлагают армировать лед сыпучими естественными материалами. Впервые подобный композит предложен профессором Скрамтаевым в 1934 г. Композит представлял собой смесь песка, гравия и воды. Он получил название «Ледяной бетон» [14].

Описаны интересные результаты опытов с ледяным композитом, полученным добавлением песка [14]. Для получения ледяного материала с равномерным распределением примеси была разработана специальная технология, заключающаяся в промораживании дозированной, тщательно перемешанной и пропитанной водой смеси снега и песка. В экспериментах на одноосное сжатие исследовалось влияние крупности песка и скорости нагружении образца. Результаты опытов показали, что прочность композита довольно заметно уменьшается при увеличении крупности песка. Поэтому, по мнению исследователей, при возведении сооружений из такого композитного материала необходимо стремиться к использованию мелкозернистых добавок и наиболее плотных их упаковке [13], [14].

Для надежного функционирования морских ледовых сооружений необходимо предусмотреть мероприятия по сохранению необходимых габаритных размеров сооружения, например, проводить намораживание дополнительных буферных зон, которые будут таять в летний период, и предотвращать разрушение основного ледового сооружения. При средней скорости таяния ледового массива порядка 8-10 см/сут ширина буферных зон должна составлять 50-80 м. При многолетнем использовании сооружения требуется ежегодное восстановление буферных зон.

Более надежной, но дорогой защитой морских ледовых сооружений от таяния является гидро- и теплоизоляция ледового массива от тепловых воздействий окружающей среды. Наиболее простой является теплозащиты ледового материала сыпучим материалом. В этом случае сыпучий материал выполняет роль пригрузки и дает возможность передвижения тяжелой техники по поверхности ледового массива. Недостатком защиты является возможное разрушение покрытие боковых поверхностей при ледоходе и волнении. Теплозащиты ледовых сооружений сыпучим материалом рекомендуются в районах, где в достаточном количестве имеется материал для покрытия. Такая защита была использована на одном из объектов советской Арктики. Для гидрозащиты используют пленочные материалы, которые укладываются на ледовый массив по засыпку. Возможна защита ледового массива наклонными или вертикальными стенками из стали, бетона или дерева. За стенками, как правило, необходимо предусмотреть 1,5-2,0 м

песчаной отсыпки или прокладку другого, гидро- или теплоизоляционного материала. При этом следует учитывать, что стальная стенка обладает высокой теплопроводностью и требует более тщательной теплоизоляции ледового массива, поэтому предпочтение отдается стенкам из дерева, которые могут служить и опалубкой при послойном намораживании.

Перспективным является применение хладостойких полимерных материалов – пенопластов. Из строительных пенопластов, применяемых в настоящее время, наиболее приемлемыми являются пенополиуретаны, у которых замкнуто-ячеистая структура, и водопоглащение не превышает 300 см^3/см^2. Целью создания материалов с высокими теплотехническими качествами, а также прочностью, хладостойкостью с одновременным снижением расхода полимерного материала может быть применение композитных пенопластов с минеральным наполнителем, например, керамзитовым гравием.

В качестве материла для гидрозащиты возможно использование пленочных полимерных материалов ЦДБ толщиной до 0,5 мм, могут эксплуатироваться при температурах от минус 55 до плюс 120 °С, имеют предел прочности на разрыв не менее 3,5 МПа и относительное удлинение 40%.

Результаты и обсуждение

Были проведены лабораторные исследования Сибирским отделением Академии Наук по нанесению пенополиуретановых покрытий на ледовый массив [15]. Для испытаний была выбрана композиция ППУ-17Н, которую можно наносить напылением на изолируемую поверхность при температурах до минус 25 °С.

Основные физико-механические свойства пенополиуретана ППУ-17Н, наносимого методом напыления, следующие:

- кажущаяся плотность – 40-70, кг/см^3;
- теплопроводность при 20 °С, не более 0,035 Вт/мК;
- разрушающее напряжение при изгибе – не менее 0,4 МПа, при сжатии – не менее 0,2 МПа;
- водопоглощениее за 24 ч – не более 300 см^3/см^2;
- горючесть – трудновоспламеняемый.

Для проведения исследований были искусственно наморожены 2 ледовых куба с ребром 0,6 м. Напыление проводилось с помощью установки «Пена-9М», разработанной НПО «Полимерсинтез». Общая толщина слоя ППУ-17Н в среднем составляла 5 см и создавалась напылением в три слоя [15].

Проведенные испытания показали, что при напылении ППУ-17Н на горизонтальную поверхность льда происходит формирование однородного слоя. При напылении на вертикальную поверхность происходило стекание композиции. Для обеспечения возможности напыления пенополиуретана на вертикальную поверхность был использован армирующий слой – капроновая сетка с размером ячейки 7×7 мм, что позволило получить качественный слой пенополиуретана на вертикальной ледовый поверхности.

Испытания на адгезионную прочность ППУ-17Н ко льду были проведены Сибирским отделением Академии Наук после суточной выдержки с помощью переносного адгеизиометра, разработанного в НПО «Полимерсинтез». Испытания проводились на пяти образцах. Адгезионная прочность слоя ППУ-17Н ко льду оказалась равной 50-75 кПа, а с применением армирующего слоя – 123 кПа.

Проведенные исследования Сибирским отделением Академии Наук показали возможность использования композита ППУ-17Н для термозащиты ледовых массивов при наличии соответствующих установок [15].

Заключение

Стоит подчеркнуть важность и актуальность разработки композитных материалов с ледяной матрицей в контексте современных вызовов в области строительства и инженерии. Развитие таких инновационных материалов предоставляет широкий спектр возможностей для решения сложных задач, связанных с созданием устойчивых и прочных сооружений в условиях ледяных регионов. Одним из ключевых достижений исследования является понимание важности армирующих волокон в повышении прочности и устойчивости ледяных конструкций. Волокна, выполняющие роль армирующих элементов в композитах, способны эффективно контролировать распространение трещин, увеличивая сопротивление разрушению материала. Это открывает перспективы для создания более долговечных и надежных ледяных сооружений, которые могут успешно функционировать в экстремальных условиях.

Дальнейшие исследования в области композитных материалов с ледяной матрицей могут быть направлены на оптимизацию параметров материалов, исследование их поведения при различных температурных режимах, а также разработку инновационных методов производства и использования. Особое внимание следует уделить анализу взаимодействия между компонентами композита на микро- и макроскопическом уровне, чтобы более точно предсказывать и контролировать механические свойства материала.

Эксперименты и исследования на практике позволят оценить эффективность применения композитных материалов с ледяной матрицей в различных сферах, таких как строительство ледовых сооружений, морская инфраструктура, а также научные исследования в полярных регионах. Результаты таких исследований могут быть использованы для создания более устойчивой и безопасной инфраструктуры в экстремальных климатических условиях. Важно отметить, что создание композитных материалов с ледяной матрицей также открывает новые горизонты для сотрудничества между различными областями науки и промышленности. Инженеры, материаловеды, исследователи климата и экологии могут совместно разрабатывать инновационные решения, способствующие более эффективному использованию ледяных ресурсов и созданию устойчивой инфраструктуры в ледяных регионах. Исследование композитных материалов с ледяной матрицей представляет собой область с большим потенциалом для развития и инноваций. Понимание основных механизмов взаимодействия компонентов композита, а также оптимизация их свойств, поможет создать новые материалы, способные революционизировать подходы к строительству и

использованию сооружений в условиях ледяных регионов. Это имеет не только практическое, но и экологическое значение, способствуя более устойчивому и ресурсосберегающему использованию ледяных ресурсов нашей планеты.

Финансирование

Проект выполняется при поддержке Минобрнауки России, «Исследование статистических закономерностей ледовых нагрузок на инженерные сооружения и разработка нового метода их вероятностного моделирования (FSEG-2020-0021)».

Funding

This work was done as a part of Project «Study of Statistical Patterns of Ice Loads on Engineering Structures and Development of a New Method for Their Stochastic Modeling (FSEG-2020-0021), No. 0784-2020-0021» supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Шарапов Д.А. Термодинамическая модель ледового воротника в гидротехническом строительстве / Д.А. Шарапов, Ю.С. Клочков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2023. — Т. 25. — № 3(113). — С. 107-113. — DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-107-113.

2. Sharapov D. Evolution of Ice Load Prediction Tools for Hydrotechnical Construction / D. Sharapov // E3S Web of Conf. — 2023. — № 402. — DOI: 10.1051/e3sconf/202340205023.

3. Шарапов Д.А. Устойчивость каменной наброски к подвижкам льда методом КЭ / Д.А. Шарапов, А.С. Сумцова // Гидротехническое строительство. — 2023. — № 2. — С. 2-7. — DOI: 10.34831/EP.2023.13.50.001.

4. Васильев Н.К. Испытания консолей армированного морского льда / Н.К. Васильев, М.М. Карулина, А.В. Марченко [и др.] // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. — 2015. — № 277. — С. 46-56.

5. Сазонов К.Е. Материаловедение. Свойства материалов. Методы испытаний. Лед и снег / К.Е. Сазонов. — СПб: РГГМУ, 2009. — 194 с.

6. Gold L.W. The Habbakuk Project – Building Ship from Ice / L.W. Gold // Proceedings of International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'89). — Lulea, 1989. — P. 1211-1228.

7. Борщук И.Л. Анализ возможных методов улучшения физико-механических свойств снега и льда в интервале температур, близкиз к 0°С / И.Л. Борщук // Вестник научной информации Забайкальского филиала Географ. Общества СССР. — 1968. — № 9. — С. 72-90.

8. Марчук А.Н. Перекрытие рек под ледяным покровом / А.Н. Марчук. — Москва: Энергия, 1973. — 103 с.

9. Алтунина Л.К. Криогели для тампонажных работ в районах распространения многолетне-мерзлых пород / Л.К. Алтунина, В.К. Кувшинов, С.В. Долгих // Гидротехника. — 2010. — № 3(20). — С. 52-57.

10. Pronk A.D.C. The Calculation and Construction of a 30 Meter Span Ice Dome / A.D.C. Pronk, A. Borgart, J.M. Hijl, [et al.] // Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium "Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints". — Brasília, 2014. — P. 1-8.

11. Гайдукова Е.В. Материаловедение: Гидрология / Е.В. Гайдукова. — Санкт-Петербург: Рос. гос. гидрометеорол. ун-т., 2006. — 92 с.

12. Войтковский К.Ф. Механические свойства льда / К.Ф. Войтковский. — Москва: Изд-во Акад. наук СССР, 1960. — 100 с.

13. Лотышева А.А. Экспериментальные исследования образцов льда армированного природными материалами / А.А. Лотышева, О.В. Якименко, А.А. Лунев // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. — Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, 2021. — С. 325-330.

14. Скрамтаев Б.Г. Теория прочности бетона: Новые виды бетонов / Б.Г. Скрамтаев // Доклады, прочитанные на Всеукр. конференции по бетону и железобетону 17-19 июня 1933 г. — Харьков: Гос.-науч. техн. изд-во Украины, 1934. — С. 56.

15. Бубырь А.А. Термический режим портовых гидротехнических сооружений / А.А. Бубырь // Труды транспортно-энергетического института. Выпуск XII. Вопросы ледотермики. — Новосибирск: Издательство сибирского отделения АН СССР, 1961.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Sharapov D.A. Termodinamicheskaja model' ledovogo vorotnika v gidrotehnicheskom stroitel'stve [Thermodynamic Model of an Ice Collar in Hydraulic Engineering] / D.A. Sharapov, Ju.S. Klochkov // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. — 2023. — Vol. 25. — № 3(113). — P. 107-113. — DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-107-113. [in Russian]

2. Sharapov D. Evolution of Ice Load Prediction Tools for Hydrotechnical Construction / D. Sharapov // E3S Web of Conf. — 2023. — № 402. — DOI: 10.1051/e3sconf/202340205023.

3. Sharapov D.A. Ustojchivost' kamennoj nabroski k podvizhkam l'da metodom KE [Stone Slope Resistance to Ice Shifts by FE Method] / D.A. Sharapov, A.S. Sumtsova // Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo [Hydraulic Engineering]. — 2023. — № 2. — P. 2-7. — DOI: 10.34831/EP.2023.13.50.001. [in Russian]

4. Vasil'ev N.K. Ispytanija konsolej armirovannogo morskogo l'da [Reinforced Sea Ice Cantilever Testing] / N.K. Vasil'ev, M.M. Karulina, A.V. Marchenko [et al.] // Izvestia VNIIG im. B.E. Vedeneeva [Proceedings of VNIIG named after B.E. Vedeneyev]. — 2015. — № 277. — P. 46-56. [in Russian]

5. Sazonov K.E. Materialovedenie. Svojstva materialov. Metody ispytanij. Led i sneg [Materials Science. Material Properties. Test Methods. Ice and Snow] / K.E. Sazonov. — SPb: RSHMU, 2009. — 194 p. [in Russian]

6. Gold L.W. The Habbakuk Project – Building Ship from Ice / L.W. Gold // Proceedings of International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC’89). — Lulea, 1989. — P. 1211-1228.

7. Borschuk I.L. Analiz vozmozhnyh metodov uluchshenija fiziko-mehanicheskih svojstv snega i l'da v intervale temperatur, blizkiz k 0°S [Analysis of Possible Methods for Improving the Physical and Mechanical Properties of Snow and Ice in the Temperature Range Close to 0°C] / I.L. Borschuk // Vestnik nauchnoj informacii Zabajkal'skogo filiala Geograf. Obshhestva SSSR [Bulletin of Scientific Information of the Trans-Baikal Branch Geographic Society of the USSR]. — 1968. — № 9. — P. 72-90. [in Russian]

8. Marchuk A.N. Perekrytie rek pod ledjanym pokrovom [Blocking of Rivers under Ice Cover] / A.N. Marchuk. — Moscow: Energija, 1973. — 103 p. [in Russian]

9. Altunina L.K. Kriogeli dlja tamponazhnyh rabot v rajonah rasprostranenija mnogoletne-merzlyh porod [Cryogels for Plugging Operations in Permafrost Areas] / L.K. Altunina, V.K. Kuvshinov, S.V. Dolgih // Gidrotehnika [Hydraulic Engineering]. — 2010. — № 3(20). — P. 52-57. [in Russian]

10. Pronk A.D.C. The Calculation and Construction of a 30 Meter Span Ice Dome / A.D.C. Pronk, A. Borgart, J.M. Hijl, [et al.] // Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium “Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints”. — Brasília, 2014. — P. 1-8.

11. Gajdukova E.V. Materialovedenie: Gidrologija [Materials Science: Hydrology] / E.V. Gajdukova. — St. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University, 2006. — 92 p. [in Russian]

12. Vojtkovskij K.F. Mehanicheskie svojstva l'da [Mechanical Properties of Ice] / K.F. Vojtkovskij. — Moscow: Publishing House of the USSR Acad. of Sciences, 1960. — 100 p. [in Russian]

13. Lotysheva A.A. Eksperimental'nye issledovanija obraztsov l'da armirovannogo prirod-nymi materialami [Experimental Studies of Ice Samples Reinforced with Natural Materials] / A.A. Lotysheva, O.V. Jakimenko, A.A. Lunev // Arhitekturno-stroitel'nyj i dorozhno-transportnyj kompleksy: problemy, perspektivy, innovacii [Architectural and Construction and Road Transport Complexes: Problems, Prospects, Innovations]. — Omsk: Siberian State Automobile and Road University, 2021. — P. 325-330. [in Russian]

14. Skramtaev B.G. Teorija prochnosti betona : Novye vidy betonov [Theory of Concrete Strength: New Types of Concrete] / B.G. Skramtaev // Doklady, prochitannye na Vseukr. konferencii po betonu i zhelezobetonu 17-19 iyunya 1933 g [Reports read at the All-Ukr. Conferences on Concrete and Reinforced Concrete, June 17-19, 1933]. — Kharkiv: State Scientific Technological Publishing House of Ukraine, 1934. — P. 56. [in Russian]

15. Bubyr' A.A. Termicheskij rezhim portovyh gidrotehnicheskih sooruzhenij [Thermal Regime of Port Hydraulic Structures] / A.A. Bubyr' // Trudy transportno-jenergeticheskogo instituta. Vypusk XII. Voprosy ledotermiki [Works of the Transport and Energy Institute. Issue XII. Issues of Ice Thermals]. — Novosibirsk: Academy of Sciences of the USSR Siberian Branch, 1961. [in Russian]