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

DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.196

НАМОРАЖИВАНИЕ ЛЬДА В ГИДРОТЕХНИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Научная статья

Андреева С.А.[1], Шарапов Д.А.[2,] *, Кудряшова Е.Е.[3], Савельева В.В.[4]
[2] ORCID : 0000-0001-8650-2375;
[3] ORCID : 0009-0007-9451-0368;
[1] Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2, 3, 4] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

Аннотация

В статье рассматриваются основные методы по намораживанию льда, такие как послойное, брызговое или факельное, кладка из ледовых блоков и объемное намораживание. Рассматриваются преимущества и недостатки каждого способа возведения конструкций, такие как скорость возведения конструкции, экономическая составляющая и прочностные особенности искусственно созданного льда в зависимости от выбранного метода намораживания. Оценка методов позволит выбрать оптимальный метод возведений конструкции в зависимости от целей ее использования. Методики намораживания льда применимы как к возведению ледовых переправ, созданию искусственных сооружений изо льда, так и усилению несущих конструкций, потерявших свою несущую способность.

Ключевые слова: намораживание льда, ледовые конструкции, послойное намораживание, брызговое намораживание.

ICE REINFORCING IN HYDRAULIC ENGINEERING

Research article

Andreeva S.A.[1], Sharapov D.A.[2,] *, Kudryashova E.E.[3], Saveleva V.V.[4]
[2] ORCID : 0000-0001-8650-2375;
[3] ORCID : 0009-0007-9451-0368;
[1] Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg, Russian Federation
[2, 3, 4] Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation

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

Abstract

The article examines the main methods of ice reinforcing, such as layer-by-layer, spray or torch reinforcing, ice block construction and volumetric reinforcing. The advantages and disadvantages of each method of erecting structures are discussed, such as the speed of building the structure, the economic component and the strength characteristics of the artificially created ice depending on the chosen reinforcing method. Evaluation of the methods will allow to choose the optimal method of erecting the structure depending on the purpose of its use. Ice reinforcing methods are applicable both to the construction of ice crossings, creation of artificial ice structures and reinforcement of bearing structures that have lost their bearing capacity.

Keywords: ice reinforcing, ice structures, layer-by-layer reinforcing, spray reinforcing.

Введение

Намораживание льда рассматривается как способ усиления существующих конструкций, так и создания временных ледовых сооружений. Ввиду активного развития района Крайнего Севера, поиска новых месторождений и строительства новой инфраструктуры, возникает необходимость обследования новых территорий, выгрузки строительных материалов, развития теоретических и практических методов [1], [2], [3], [4]. При строительстве гидротехнических сооружений возникает необходимость в использовании ледовых дорог [5], [6], [7], которые позволяют осуществлять строительство в зимнее время и исключить дорогостоящую перебазировку плав средств. Опыт использования ледовых дорог при строительстве морского порта Сабетта [8]. Одним из примеров ледового причала ледяной пирс на мысе Шмидта [9], [10], [11], [12]. Однако намораживание льда не всегда экономически целесообразно. Для оценки рациональности намораживания ледовых сооружений была разработана карта потенциальных ледозапасов, зависимость интенсивности брызгового намораживания от температуры и скорости ветра [13], [14], [15], [16]. При создании ледовых конструкций искусственным методом следует оценить все варианты возведения конструкции, и оценить их преимущества и недостатки. Одним из важнейших факторов выбора способа намораживания является критерий прочности, который отличается в рассматриваемых методах. Также немаловажную роль имеет временной критерий, например, метод послойного намораживания будет более долгим, чем факельный – метод набрызга, но более прочный.

Целью работы является исследование способов намораживания и возведения ледовых сооружений, таких как ледовые дороги, причалы или дамбы.

Задачами исследования является рассмотрение преимуществ и недостатков каждого способа, для возможности выбора оптимального метода намораживания под определенные цели, такие как, скорость возведения, стоимость и прочность конструкций.

Методы и зависимости

Скорость послойного намораживания зависит от времени замерзания элементарного слоя воды, определяемого в основном интенсивностью теплообмена его с окружающей средой.

В процессе формирования льда при послойном намораживании выделяются три стадии [15]:

1. Охлаждение воды до температуры кристаллизации;
2. Зарождение первичных кристаллов и образование на поверхности корки льда;
3. Рост ледяной корки до ее слияния с ледяным основанием.

Метод послойного намораживания заключается в повторяющемся послойном наливе воды толщиной от 0,5 до 10 см с последующим ее промораживанием. В практике строительства слой наливаемой воды обычно составляет 3-5 см. При большей толщине слоя воды скорость намораживания уменьшается из-за образования поверхностной корки льда. Последующий слой воды наливается после полного промерзания предыдущего и достижения им температуры минус 5-7 °С. При температурах воздуха выше минус 10 °С метод малоэффективен, так как промораживание слоя воды, особенно морской, происходит длительное время. Для повышения интенсивности намораживания рекомендуется укладка слоя ледового щебня толщиной до 10 см с последующей послойной заливкой воды слоями до 3 см.

Для уменьшения первоначальной солености искусственного льда из морской воды разработан метод намораживания на наклонной плоскости, заключающийся в порционной подаче воды на наклонную плоскость. Потоком воды смывается соль с предыдущего слоя замороженной воды и намораживается тонкий слой льда. Метод испытан в полунатурных условиях.

При реальном намораживании на подстилающей поверхности в величину времени намораживания входит еще и время залива, растекания по поверхности льда, время охлаждения воды до температуры кристаллизации, время затвердевания и время охлаждения вновь намороженного льда или его холодонакопление. Разработан ряд формул для определения времени замерзания слоя воды на льду. Для практических целей рекомендуется зависимость, разработанная В.А. Госманом [17], [18] на основе натурных исследований:

$$\tau = 6300(h/t_b)[1/(0,85 + 0,5(v^{0,86}/b^{0,14}) + h(1 + 0,5t_b)/(1 + 0,1t_b)] \quad (1)$$

где τ — время замерзания слоя воды;

h — толщина намораживаемого слоя;

t_b — средняя температура воздуха за период намораживания;

v — средняя скорость ветра;

b — характерный геометрический размер поверхности намораживания.

Зависимость выведена для замерзания пресной воды, но она дает хорошую сходимость и с натурными исследованиями замораживания морской воды.

Также была выведена теоретическая зависимость времени промерзания слоя воды от толщины слоя и гидрометеорологических факторов [11], [19].

$$\tau = (73400h + R_{sum} + R)/(a[2,6(p_1 + \varphi p) - t_b]) \quad (2)$$

где R_{sum} — суммарная солнечная радиация, поглощаемая замерзающим слоем;

R — эффективное излучение;

a — коэффициент теплоотдачи между замерзающим слоем и окружающим воздухом;

p_1 — упругость насыщенных водяных паров на поверхности замерзающего слоя;

φ — относительная влажность воздуха;

p — упругость насыщенных водяных паров в воздухе.

Метод дождевания (набрызга) заключается в капельном распылении воды на основание (рис. 1). В зависимости от гидрометеорологических условий и времени нахождения диспергированной воды в воздухе замерзает основной объем воды и на основание попадают замерзшие или переохлажденные капли воды. За счет этого скорость намораживания искусственного льда, полученного дождеванием значительно выше скорости при послойном намораживании и достигает 50-80 см/сут. Физические процессы взаимодействия диспергированной воды с атмосферным воздухом достаточно хорошо изучены [20], [21], [22]. Прочность и плотность льда, полученного дождеванием, существенно низкие по сравнению с послойно намороженным льдом. Поэтому такой лед часто уплотняют с последующей проливкой водой. Лед, полученный методом дождевания, используется при создании ледовых переправ, аэродромов. При строительстве ледовых сооружений необходимо выбирать такие режимы подачи диспергированной воды, когда в воздухе замерзает не более 20-30% объема воды. В этом случае за счет замерзания переохлажденной воды на основании плотность и прочность, будут приближаться к характеристикам льда послойного намораживания и скорость намораживания будет составлять 20-25 см/сут [23].

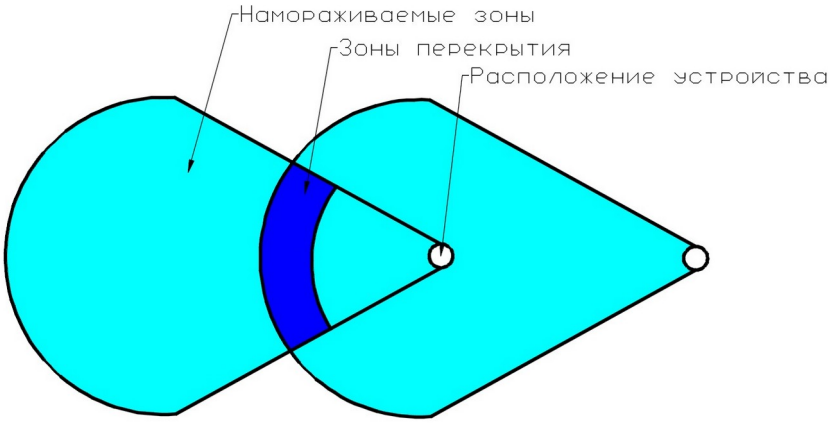

Рисунок 1 - Схема брызгового намораживания
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.196.1

Блочный метод заключается в добыче ледовых блоков из припая с помощью ледоразрушающей техники и укладки их в сооружение (рис. 2). Размеры блоков определяются из расчета грузоподъемности ледового припая и подъемной техники. Перед укладкой блоков рекомендуется проводить их хладозарядку на накопительных площадках. Для предотвращения смерзания блоков при хладозарядке с основанием и между собой устанавливают прокладки из полиэтиленовой пленки.

Возможно специальное намораживание ледовых блоков необходимых размеров и конфигураций или заготовка их в близлежащих пресноводных водоемах.

Перед укладкой ледовых блоков необходима очистка основания от снега, кроме того, рекомендуется проливка водой основания или ранее уложенного курса ледовых блоков.

Для повышения надежности ледового сооружения при воздействии горизонтальной нагрузки рекомендуется выполнять ледовые блоки фигурной формы и увеличивать шероховатость поверхностей сооружения рифлением для лучшей их смерзаемости. Необходимо предусматривать укладку ледовых блоков с перевязкой швов по длине и высоте сооружения. После укладки блоков швы между ними послойно заливаются водой и промораживаются.

Достоинствами методами являются высокие прочностные характеристики естественного льда, возможность создания вертикальных поверхностей без опалубочных работ, достаточно высокие темпы строительства [24], [25].

Рисунок 2 - Кладка из ледовых блоков
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.196.2

При объемном намораживании (рис. 3) в воду акватории помещают систему трубопроводов, через которую с помощью компрессорной установки прокачивается хладагент, что позволяет создать ледовый массив. Расстояние между трубопроводами должно быть не более 2 метров. Часть сооружения выше уровня воды намораживают одним из вышеописанных методов. Способ прошел натурные испытания [17] и может применяться при строительстве постоянных ледовых сооружений, которые будут обладать достаточно высокой надежностью. Однако стоимость строительства и эксплуатации таких сооружений будет значительно выше стоимости сооружений, возводимых другими методами.

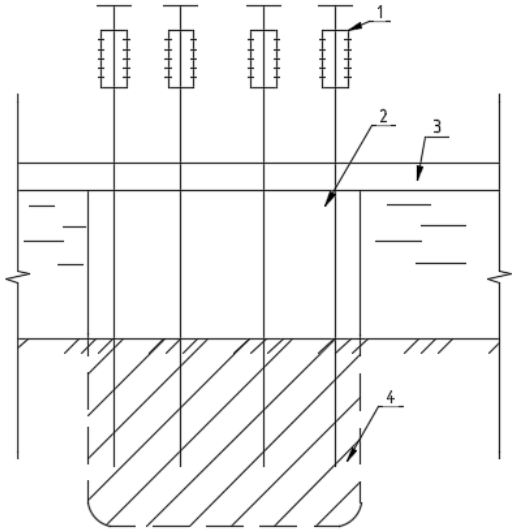

Рисунок 3 - Конструкция ледяного сооружения
DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.138.196.3

Примечание: 1 – парожидкостные СОУ; 2 – ледяной барьер; 3 – ледяной покров; 4 – промороженный грунт

Существует технология строительства из льда «айскрит», который получают из искусственного приготовленного ледового щебня с добавлением пульпы или акрилового волокна и песка.

Лед производится из пресной воды в ледогенераторах, затем измельчается и при температуре минус 20 °С укладывается в сооружение слоями 7-10 см. Для обеспечения прочности в уложенный слой добавляется вода или пульпа. Рекомендуется устройство опалубки с холодильной системой для поддержания постоянной эксплуатационной температуры минус 10 °С. Верхнее строение выполняется из бетона. Опытное сооружение площадью 20×53,5 м и объемом около 6000 м^3 построено в районе Осло.

Стоимость айскрита достаточно высока и требует специальной техники, однако авторы метода считают, что при больших объемах данный способ будет экономически оправдан.

Комбинированный метод заключается в совмещении вышеописанных технологий по созданию ледовых сооружений на одном объекте. Связано это, как правило, с сокращением сроков строительства и с более производительным использованием оборудования и механизмов при создании сооружений с большим объемом искусственного льда.

Заключение

В работе были рассмотрены основные положения и особенности усиления путем дополнительного намораживания; представлены виды намораживания льда: послойное, факельное, объемное и кладка из ледовых блоков.

На основании исследований можно сделать выводы о том, что [15], [17], [22]:

- лед, намороженный послойно более прочный, чем лед, намороженный факельным методом, так как имеет более плотную структуру;

- при возведении ледовых сооружений их необходимо оставить на период хладонакопления и только потом покрывать теплоизолирующим материалом;

- при возведении сооружений с помощью кладки из ледовых блоков прочность конструкции будет существенно выше, чем в остальных методах, исключается необходимость использования опалубки и существенно экономится время на строительство конструкций. Однако выкалывание блоков может быть достаточно трудоемко;

- при возведении конструкций методом объемного намораживания существенно увеличивается прочность конструкции, так как трубки и сваи с хладагентом служат дополнительной усиливающей арматурой. Использование термосвай позволяет поддерживать температурный режим сооружения. Метод объемного намораживания отличается от остальной высокой ценой.

Научная новизна исследования обуславливается полученными рекомендациями, позволяющими подобрать оптимальный метод возведения ледовой конструкции. Собраны и проанализированы все существующие на данный момент времени методы исследования, даны выводы и рекомендации.

Сравнение с известными рекомендациями – результаты исследований хорошо коррелируются с исследованиями, проводимыми научными институтами по возведению ледового причала факельным методом и методом послойного

намораживания, где проводился прочностной анализ сооружений [7]. Также метод использования термосвай для увеличения прочности конструкций подтверждается патентом по устройству ледового причала [26].

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Исследование статистических закономерностей ледовых нагрузок на инженерные сооружения и разработка нового метода их вероятностного моделирования (FSEG-2020-0021)» (№ 0784-2020-0021).

Конфликт интересов

Не указан.

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.

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.

Conflict of Interest

None declared.

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

2. Loset S. Actions from Ice on Arctic Offshore and coastal Structures: Student's Book for Institutes of Higher Education / S. Loset, K. Shkhinek, O.T. Gudmestad et al. — St. Petersburg: LAN, 2006. — 270 p.

3. Loset S. Comparison of the Physical Environment of Some Arctic Seas / S. Loset, K.N. Shkhinek, O.T. Gudmestad et al. // Cold Regions Science and Technology. — 1999. — Vol. 29. — Iss. 3. — P. 201-214.

4. Shkhinek K.N. Comparison of the Russian and Foreign Codes and Methods for Global Load Estimation / K.N. Shkhinek, D. Blanchet, K. Croasdale et al. // Proceedings of the 13th ISOPE Conference. — 1994. — Vol. 4. — P. 75-81.

5. РД 34.03.221 Инструктивные указания по безопасной организации переправ на реках водоемах. — Введ. 1967-11-30. — Москва: ИНФОРМЭНЕРГО, 1967. — 37 с.

6. А/л «Таймыр» Поможет Строить Порт Сабетта // Атомфлот. — 2013. — URL: http://www.rosatomflot.ru/press-centr/novosti-predpriyatiya/516-al-taymyr-pomozhet-stroit-port-sabetta/page,40/?ysclid=ll9nhn43it514359339 (дата обращения: 14.07.2023).

7. Апельсин В.Г. Проектирование, строительство и эксплуатация морских ледяных сооружений / В.Г. Апельсин. — Москва: В/О «Мортехинфореклама», 1991. — 36 с.

8. Евтушенко Г.Н. Северные порты России / Г.Н. Евтушенко, М.А. Колосов, А.В. Силин и др. — СПб: Гидрометеоиздат, 2006. — 340 с.

9. 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.

10. Ахундов Р.С. Строительство портов и гидротехнических сооружений (основные тенденции и пути развития) / Р.С. Ахундов, Г.Д. Хасхачех // Транспортстрой. — 1995. — № 5.

11. Шарапов Д.А. Гидротехническое строительство. Порты Северного морского пути / Д.А. Шарапов, И.Е. Фролова. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023. — 100 с.

12. Сазонов К.Е. Материаловедение. Свойства материалов. Методы испытаний. Лед и снег / К.Е. Сазонов. — СПб: РГГМУ, 2007. — 195 с.

13. Петухова Н.А. Возможности намораживания в условиях Восточной Сибири / Н.А. Петухова // Гляциология Восточной Сибири. — Иркутск: Наука, 1983. — С. 109-114.

14. 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.

15. Алексеев В.Р. Географическая оценка возможностей капельного намораживания воды / В.Р. Алексеев, Н.А. Петухова, Г.И. Сморыгин // Гляциология Восточной Сибири. — Иркутск: Наука, 1983. — С. 102-108.

16. Шаталина И.Н. Теплообмен в процессах намораживания и таяния льда / И.Н. Шаталина. — Ленинград: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1990. — 118 с.

17. Алексеев В.Р. Опыт возведения ледяных конструкций сложной конфигурации. Рыхлый снег как строительный материал / В.Р. Алексеев, Г.И. Сморыгин // Гляциология Восточной Сибири. — Иркутск: Наука, 1983. — С. 115-126.

18. Методические указания по определению ледовых нагрузок в водохранилищах на опоры мостов — Введ. 1998-01-01. — Москва: НИЦ «Мосты», 1998. — 25 с.

19. Сморыгин Г.И. Теория и методы получения искусственного льда / Г.И. Сморыгин. — Новосибирск: Сиб. отд-ние АН СССР, Ин-т пробл. освоения Севера, 1988. — 279 с.

20. ISO 19906:2019. Petroleum and Natural Gas Industries. Arctic Offshore Structures. — Introduced 2019-07 // ISO.org. — URL: https://www.iso.org/standard/65477.html (accessed: 14.07.2023).

21. Sharapov D. Improving Quality of 2D Ice Load Estimation on Freezed Piles / D. Sharapov, Y. Klochkov // International Journal for Quality Research. — 2023. — Vol. 17. — № 4. — DOI: 10.24874/IJQR17.04-11.

22. Andreeva S.A. Hoek-brown Model for Ice Breaking Simulation / S.A. Andreeva, D. Sharapov // Magazine of Civil Engineering. — 2023. — Vol. 123. — № 7. — P. 26-37. — DOI: 10.34910/MCE.123.3.

23. Duan C. Mathematical Modeling of Arctic Sea Ice Freezing and Melting Based on Nonlin-ear Growth Theory / C. Duan, S. Dong, Z. Wang // Continental Shelf Research. — 2020. — № 210. — DOI: 10.1016/j.csr.2020.104278.

24. Masterson D.M. The Arctic Islands Adventure and Panarctic Oils Ltd / D.M. Masterson // Cold Regions Science and Technology. — 2013. — № 85. — P. 1-14.

25. Mintu S. Ice Accretion for Ships and Offshore Structures. Part 1 – State of the Art Review / S. Mintu, D. Molyneux // Ocean Engineering. — 2022. — № 258. — DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111501.

26. Пат. 2764806 Российская Федерация, МПК E02B 3/06, E02B 17/00. Ледовый причал / Андреева С.А., Колосов М.А.; заявитель и патентообладатель Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — № 2021114205; заявл. 2021-05-20; опубл. 2022-01-21. — 8 с. — URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=47794987 (дата обращения: 14.07.2023).

Список литературы на английском языке / References in English

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

2. Loset S. Actions from Ice on Arctic Offshore and coastal Structures: Student's Book for Institutes of Higher Education / S. Loset, K. Shkhinek, O.T. Gudmestad et al. — St. Petersburg: LAN, 2006. — 270 p.

3. Loset S. Comparison of the Physical Environment of Some Arctic Seas / S. Loset, K.N. Shkhinek, O.T. Gudmestad et al. // Cold Regions Science and Technology. — 1999. — Vol. 29. — Iss. 3. — P. 201-214.

4. Shkhinek K.N. Comparison of the Russian and Foreign Codes and Methods for Global Load Estimation / K.N. Shkhinek, D. Blanchet, K. Croasdale et al. // Proceedings of the 13th ISOPE Conference. — 1994. — Vol. 4. — P. 75-81.

5. RD 34.03.221 Instruktivnye ukazanija po bezopasnoj organizatsii pereprav na rekah vodoemah [RD 34.03.221 Guidelines for the Safe Organization of Crossings on Rivers and Reservoirs]. — Introduced 1967-11-30. — Moscow: INFORMENERGO, 1967. — 37 p. [in Russian]

6. A/l «Tajmyr» Pomozhet Stroit' Port Sabetta [A/l "Taimyr" to Help Build the Sabetta Port] // Atomflot. — 2013. — URL: http://www.rosatomflot.ru/press-centr/novosti-predpriyatiya/516-al-taymyr-pomozhet-stroit-port-sabetta/page,40/?ysclid=ll9nhn43it514359339 (accessed: 14.07.2023). [in Russian]

7. Apel'sin V.G. Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsija morskih ledjanyh sooruzhenij [Design, Construction and Operation of Offshore Ice Structures] / V.G. Apel'sin. — Moscow: V/O "Mortehinforeklama", 1991. — 36 p. [in Russian]

8. Evtushenko G.N. Severnye porty Rossii [Northern Ports of Russia] / G.N. Evtushenko, M.A. Kolosov, A.V. Silin et al. — SPb: Gidrometeoizdat, 2006. — 340 p. [in Russian]

9. 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]

10. Ahundov R.S. Stroitel'stvo portov i gidrotehnicheskih sooruzhenij (osnovnye tenden-tsii i puti razvitija) [Construction of Ports and Hydraulic Structures (Main Trends and Ways of Development)] / R.S. Ahundov, G.D. Hashacheh // Transportstroj [Transportstroy]. — 1995. — № 5. [in Russian]

11. Sharapov D.A. Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo. Porty Severnogo morskogo puti [Hydraulic Engineering. Ports of the Northern Sea Route] / D.A. Sharapov, I.E. Frolova. — Saint Petersburg: Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, 2023. — 100 p. [in Russian]

12. Sazonov K.E. Materialovedenie. Svojstva materialov. Metody ispytanij. Led i sneg [Materials Science. Material Properties. Test Methods. Ice and Snow] / K.E. Sazonov. — SPb: Russian State Hydrometeorological University, 2007. — 195 p. [in Russian]

13. Petuhova N.A. Vozmozhnosti namorazhivanija v uslovijah Vostochnoj Sibiri [Possibilities of Freezing in the Conditions of Eastern Siberia] / N.A. Petuhova // Gljaciologija Vostochnoj Sibiri [Glaciology of East Siberia]. — Irkutsk: Nauka, 1983. — P. 109-114. [in Russian]

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

15. Alekseev V.R. Geograficheskaja otsenka vozmozhnostej kapel'nogo namorazhivanija vody [Geographical Assessment of the Possibilities of Drip Freezing of Water] / V.R. Alekseev, N.A. Petuhova, G.I. Smorygin // Gljaciologija Vostochnoj Sibiri [Glaciology of East Siberia]. — Irkutsk: Nauka, 1983. — P. 102-108. [in Russian]

16. Shatalina I.N. Teploobmen v protsessah namorazhivanija i tajanija l'da [Heat Transfer in the Processes of Freezing and Melting Ice] / I.N. Shatalina. — Leningrad: Energoatomizdat. Leningrad branch, 1990. — 118 p. [in Russian]

17. Alekseev V.R. Opyt vozvedenija ledjanyh konstruktsij slozhnoj konfiguratsii. Ryhlyj sneg kak stroitel'nyj material [Experience in the Construction of Ice Structures of Complex Configuration. Loose Snow as a Building Material] / V.R. Alekseev, G.I. Smorygin // Gljaciologija Vostochnoj Sibiri [Glaciology of East Siberia]. — Irkutsk: Nauka, 1983. — P. 115-126. [in Russian]

18. Metodicheskie ukazanija po opredeleniju ledovyh nagruzok v vodohranilischah na opory mostov [Ice Loads in Reservoirs on Bridge Supports] — Introduced 1998-01-01. — Moscow: Research Center "Mosty", 1998. — 25 p. [in Russian]

19. Smorygin G.I. Teorija i metody poluchenija iskusstvennogo l'da [Theory and Methods for Obtaining Artificial Ice] / G.I. Smorygin. — Novosibirsk: Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR, Institute of Problems of Development of the North, 1988. — 279 p. [in Russian]

20. ISO 19906:2019. Petroleum and Natural Gas Industries. Arctic Offshore Structures. — Introduced 2019-07 // ISO.org. — URL: https://www.iso.org/standard/65477.html (accessed: 14.07.2023).

21. Sharapov D. Improving Quality of 2D Ice Load Estimation on Freezed Piles / D. Sharapov, Y. Klochkov // International Journal for Quality Research. — 2023. — Vol. 17. — № 4. — DOI: 10.24874/IJQR17.04-11.

22. Andreeva S.A. Hoek-brown Model for Ice Breaking Simulation / S.A. Andreeva, D. Sharapov // Magazine of Civil Engineering. — 2023. — Vol. 123. — № 7. — P. 26-37. — DOI: 10.34910/MCE.123.3.

23. Duan C. Mathematical Modeling of Arctic Sea Ice Freezing and Melting Based on Nonlin-ear Growth Theory / C. Duan, S. Dong, Z. Wang // Continental Shelf Research. — 2020. — № 210. — DOI: 10.1016/j.csr.2020.104278.

24. Masterson D.M. The Arctic Islands Adventure and Panarctic Oils Ltd / D.M. Masterson // Cold Regions Science and Technology. — 2013. — № 85. — P. 1-14.

25. Mintu S. Ice Accretion for Ships and Offshore Structures. Part 1 – State of the Art Review / S. Mintu, D. Molyneux // Ocean Engineering. — 2022. — № 258. — DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111501.

26. Pat. 2764806 Russian Federation, IPC E02B 3/06, E02B 17/00. Ledovyj prichal [Ice Berth] / Andreeva S.A., Kolosov M.A.; applicant and patentee State University of Maritime and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov. — № 2021114205; appl. 2021-05-20; publ. 2022-01-21. — 8 p. — URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=47794987 (accessedL 14.07.2023). [in Russian]