

УДК 624.012.45

В.В. МАЛЮК¹, инженер (mvv.77@mail.ru),В.Д. МАЛЮК¹, канд. техн. наук;С.Н. ЛЕОНОВИЧ^{2,3}, д-р техн. наук, иностранный академик РААСН (sleonovich@mail.ru)¹ Филиал «ЦНИИП Минстроя России» ДальНИИС (690033, г. Владивосток, ул. Бородинская, 14)² Белорусский национальный технический университет (220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65)³ Qingdao University of Technology (266033, China, 11 Fushun Rd, Qingdao)

Методика обследования железобетонных конструкций портовых сооружений (о. Сахалин)

Представлено детальное обследование, проведенное на трех сооружениях, которое включало в себя исследование температурного режима бетона в зоне переменного уровня воды; отбор проб бетона из различных участков конструкций в зоне переменного уровня с целью дальнейших лабораторных исследований; определение механических и физических свойств бетона непосредственно в конструкциях. Физико-механические свойства бетона: прочность, морозостойкость, водонепроницаемость, водопоглощение, пористость, вещественный состав бетона, определяли стандартными методами. Химический анализ материалов проводился с использованием стандартных и нестандартных методов, применяемых при аналогичных исследованиях, для определения агрессивности морской воды к бетону. Глубину проникновения хлорид-ионов определяли по вещественному составу и дополнительно – с помощью метода изменения цвета бетона.

Ключевые слова: методика обследования, железобетонные конструкции, портовые сооружения, сценарии разрушения.

Для цитирования: Малюк В.В., Малюк В.Д., Леонович С.Н. Методика обследования железобетонных конструкций портовых сооружений (о. Сахалин) // Бетон и железобетон. 2021. № 5–6 (607–608). С. 67–72.

V.V. MALYUK¹, Engineer (mvv.77@mail.ru),V.D. MALYUK¹, Candidate of Sciences (Engineering);S.N. LEONOVICH^{2,3}, Doctor of Sciences (Engineering) (sleonovich@mail.ru), Foreign Academician of RAACS (sleonovich@mail.ru)¹ Branch of the Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation, Far Eastern Research, Design and Technological Institute for Construction (14, Borodinskaya Street, Vladivostok, 690033, Russian Federation)² Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosty Avenue, Minsk, 220013, Belarus)³ Qingdao University of Technology (11, Fushun Rd, Qingdao, 266033, China)

Methods of Inspection of Reinforced Concrete Structures of Port Installations (Sakhalin Island)

A detailed survey conducted on three structures is presented, which included a study of the temperature regime of concrete in the zone of variable water level; sampling of concrete from various sections of structures in the zone of variable level for further laboratory studies; determination of the mechanical and physical properties of concrete directly in the structures. The physical and mechanical properties of concrete: strength, frost resistance, water-tightness, water absorption, porosity, material composition of concrete were determined by standard methods. Chemical analysis of materials was carried out using standard and non-standard methods applied in similar studies to determine the aggressiveness of seawater to concrete. The penetration depth of chloride ions was determined by the material composition and additionally determined using the method of changing the color of concrete.

Keywords: survey methodology, reinforced concrete structures, port installations, destruction scenarios.

For citation: Malyuk V.V., Malyuk V.D., Leonovich S.N. Methods of inspection of reinforced concrete structures of port installations (Sakhalin island). *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2021. No. 5–6 (607–608), pp. 67–72. (In Russian).

Мировая практика показывает, что экономическая потребность в рациональном использовании ресурсов вызывает новые требования к процессу проектирования сооружений – проектирование по жизненному циклу. Это предопределяет новый подход к проектированию долговечности конструкций, основная цель которого заключается в назначении обоснованных показателей долговечности, позволя-

ющих обеспечить экономически сбалансированные технические решения на этапе строительства и эксплуатации сооружения. Мировая тенденция в проектировании – это переход проектирования долговечности от классических принципов по нормативным требованиям (prescriptive specification) к концепции по эксплуатационным показателям (performance-based design) [1–15].

Развитие современной концепции проектирования долговечности по эксплуатационным характеристикам ограничивает многообразие факторов, влияющих на процесс разрушения бетона и недостаточное понимание их роли во всех необходимых деталях, а методы испытаний, используемые в лаборатории, не всегда отражают реальные условия. Несоответствие между эксплуатационными и лабораторными условиями вносит неопределенность оценки факторов, определяющих долговечность бетонной конструкции в реальных условиях.

Широкий диапазон и большое количество исследований, посвященных изучению долговечности бетона за последние 100 лет, позволил получить большой объем информации о процессах разрушения бетона в условиях морозного воздействия. На этой основе разработаны методы расчета и технологические принципы получения бетона высокой морозостойкости.

Особенности деструкции портовых железобетонных конструкций

Исследования морских гидротехнических сооружений в суровых климатических условиях эксплуатации Севера и Дальнего Востока позволили установить, что уязвимыми для разрушения бетона являются части конструкций, расположенные как в зоне действия прилива и отлива, так и в зоне всплеска волн. Традиционно принято считать, что основным фактором внешних воздействий является многократное замораживание и оттаивание из-за цикличности приливов и отливов. Имитация этих условий заложена в стандартном методе испытаний морозостойкости бетона. Связь между морозостойкостью, выраженная количеством циклов ПЗО (процесс замораживания-оттаивания), и свойствами бетона заложена в технологических подходах при изготовлении конструкций для зоны переменного уровня. Однако наблюдаемое разрушение бетона в конструкциях после первого зимнего периода свидетельствует о многообразии форм взаимодействия конструкций морских сооружений с внешней средой, и традиционные подходы к обеспечению долговечности бетона в зоне переменного уровня, очевидно, не всегда эффективны.

Сложность проблемы долговечности из-за многофакторности воздействий не позволяет в настоящее время дать универсальный метод проектирования конструкций на заданный срок службы конструкций в условиях морозного воздействия. Однако разработанные в настоящее время общие принципы расчета долговечности позволяют перейти к разработке практических моделей долговечности для конкретных условий эксплуатации. Необходимо, во-первых, иметь достоверную информацию

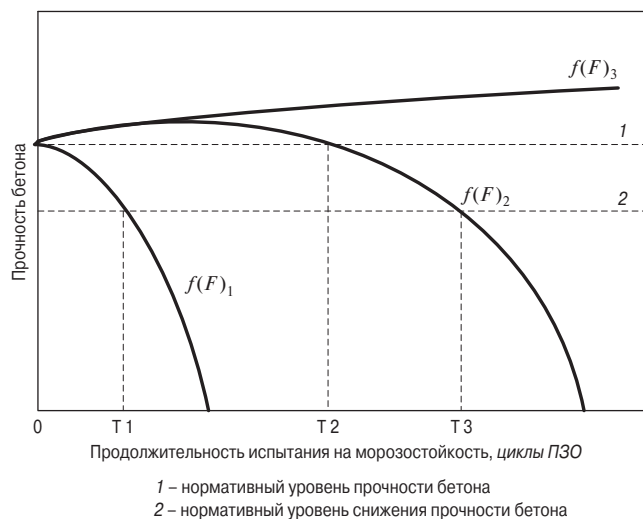


Рис. 1. Схема сценариев морозостойкости бетона при стандартных испытаниях

Fig. 1. Scheme of scenarios for concrete frost resistance during standard tests

о разрушающей нагрузке от морозного воздействия и, во-вторых, знать качественные показатели бетона, обеспечивающие несущую способность от этой нагрузки. Для этого необходимо знать следующее:

- механизмы замораживания бетона на различных участках зоны переменного уровня воды;
- механизмы разрушения бетона на различных участках зоны переменного уровня воды;
- показатели свойств бетона, определяющие стойкость бетона в реальных условиях эксплуатации;
- технологические факторы, влияющие на долговечность бетона;
- причины разрушения бетона в конструкциях.

Цель исследований.

Сценарии разрушения бетона

В качестве рабочей гипотезы в настоящей работе процесс коррозии бетона при морозном воздействии рассматривается как двухэтапный, состоящий из периода иницирования и деградации. Это основано на современных положениях о механизмах разрушения бетона при морозном воздействии и сценариях развития процессов деградации бетона при стандартных испытаниях.

Наблюдения за стандартными испытаниями морозостойкости показывают, что разрушение бетона может происходить по трем сценариям (рис. 1):

- сценарий 1: снижение прочности происходит после первого цикла замораживания – $f(F)_1$;
- сценарий 2: бетон имеет определенный период со стабильной прочностью или с растущей прочностью – $f(F)_2$;
- сценарий 3: прочность бетона при стандартных испытаниях не снижается на протяжении большего

числа циклов ПЗО – $f(F)_3$, это можно отнести к бетону с маркой по морозостойкости более F2000, поскольку считается, что в дальнейшем он разрушаться не будет.

Влияние водонасыщения на кинетику морозной деструкции

Принимая во внимание современные представления о механизме разрушения бетона при морозном воздействии, процесс коррозии бетона целесообразно связывать не только с количеством циклов замораживания-оттаивания, но и с процессами водонасыщения бетона (S_{ACT}) при попеременном замораживании и оттаивании в реальных условиях эксплуатации. В этом случае процесс коррозии можно разделить на стадию иницирования и деградацию. Стадия иницирования характеризует период, когда фактическое водонасыщение пор S_{ACT} достигает критической степени S_{CR} . При $S_{ACT}=S_{CR}$ начинается процесс деградации, поскольку в структуре бетона могут возникать растягивающие напряжения, инициирующие появления микро- и макротрещин. Наличие критической степени насыщения бетона S_{CR} следует считать определяющим признаком периода деградации.

В соответствии со схемой развития процессов деградации бетона при стандартных испытаниях (рис. 1) закономерность снижения показателя морозостойкости следует рассматривать для трех типов бетона:

– тип F1 – деградация бетона происходит после первого цикла замораживания, т. е. бетон к началу морозного воздействия имеет критический уровень водонасыщения, поэтому имеется только период деградации $0-T_1$; закономерность снижения прочности соответствует функции $f(F)_1$;

– тип F2 – на момент воздействия отрицательной температуры критическое водонасыщение не достигнуто, но при дальнейшем воздействии циклов замораживания-оттаивания есть вероятность дополнительного водонасыщения до критического уровня, возможность этого подтверждена экспериментально, бетон имеет период иницирования $0-T_2$ и период деградации T_2-T_3 ; сценарий для закономерности $f(F)_2$;

– тип F3 – деградации бетона при морозных воздействиях не происходит, сценарий для закономерности $f(F)_3$.

Следовательно, долговечность бетона в условиях, когда доминирующим фактором является морозное воздействие, должна определяться продолжительностью насыщения капиллярных пор до критического уровня. Период иницирования в этом случае является характеристикой долговечности бетона. Отсутствие периода иницирования для бетона свидетельствует о неспособности бетона сопротивляться внешним воздействиям.

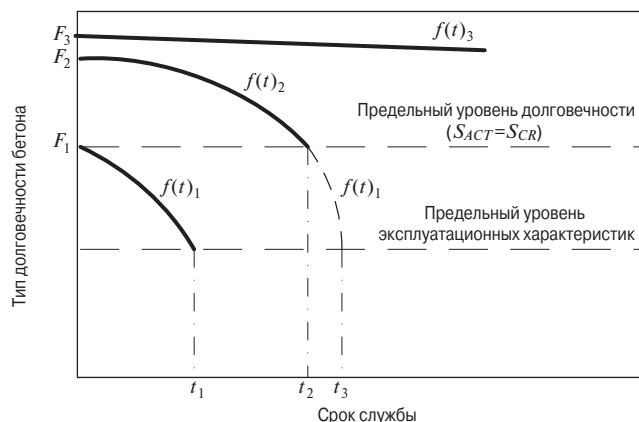


Рис. 2. Принципиальная схема моделирования
Fig. 2. Schematic diagram for simulation

Стандартные испытания на морозостойкость могут объективно прогнозировать стойкость бетона в реальных условиях эксплуатации, когда преобладающим фактором при морозных воздействиях являются многочисленные циклы замораживания-оттаивания и температура замораживания близка к температуре замораживания при стандартных испытаниях, т. е. $-15-20^{\circ}\text{C}$.

Графическое представление сценариев долговечности бетона при морозных воздействиях показано на рис. 2.

Из схемы рис. 2 видно, что для недолговечных бетонов модель долговечности бетона должна разрабатываться в соответствии с закономерностью деградации $f(t)_1$, поскольку период иницирования отсутствует. Анализ показывает, что в основном исследуются модели долговечности для закономерности $f(t)_1$, т. е. для недолговечного бетона. Например, феноменологическая модель и структурная теория морозостойкости рассматривают период деградации обычных бетонов, у которых период иницирования отсутствует или очень мал. С точки зрения практической целесообразности проектирование бетона и технологический процесс бетонных работ для портовых конструкций должны строиться на обеспечении функциональной зависимости $f(t)_2$ и $f(t)_3$. Из схемы, представленной на рис. 2, следует, что бетон можно классифицировать как по долговечности, так и по эксплуатационным характеристикам.

Объект обследования,

принципы построения методики обследования

Принимая в качестве рабочей гипотезы двухэтапный процесс водонасыщения в структуре бетона и выделяя в нем главный период – период иницирования, в данной работе приведено изучение факторов, влияющих на процесс водонасыщения бетона в конструкциях причальных и транспортных сооружений, и влияние этого процесса на долговеч-

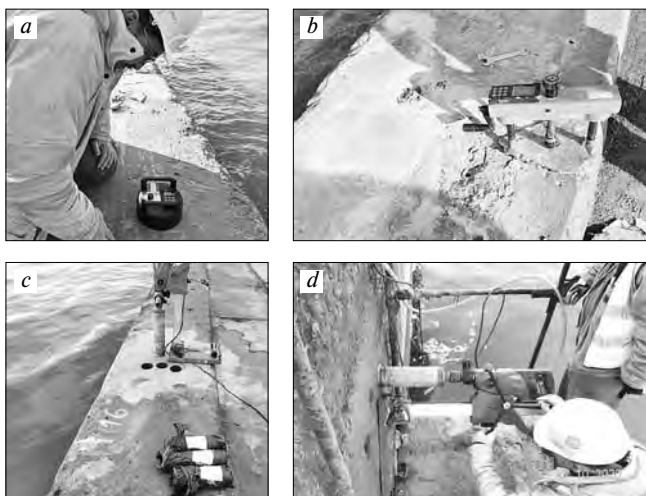


Рис. 3. Процесс определения свойств бетона в конструкции и отбор кернов для лабораторных исследований: а – определение водонепроницаемости ускоренным методом прибором ВВП-1-3; б – определение прочности неразрушающим методом; с и d – отбор кернов соответственно из горизонтального и вертикального участка конструкции зоны переменного уровня воды

Fig. 3. The process of determining the properties of concrete in the structure and sampling of cores for laboratory research: a – determination of water tightness by the accelerated method using the device VIP-1-3; b – determination of strength by non-destructive method; c and d – coring, respectively, from the horizontal and vertical sections of the structure of the zone of variable water level

ность бетона. В этом случае долговечность бетона при морозном воздействии зависит от кинетики процесса водонасыщения бетона и льдообразования в реальных условиях. Это положение принято за основу в построении программ натурных и экспериментальных исследований для реализации поставленной цели.

Объектами при натурных исследованиях являются бетонные конструкции портовых сооружений, работающие в зоне переменного уровня воды на побережье юга о. Сахалин. Методология оценки объектов исследований построена для достижения поставленной цели – уточнить реальную работу бетона в зоне переменного уровня воды при морозном воздействии и на основе изучения опыта строительства и эксплуатации портовых сооружений определить критические показатели внешних воздействий, влияющих на долговечность бетона в зоне переменного уровня воды.

Методика обследования строилась на основе принципов, заложенных в действующих нормативных документах, – разделения работы на три этапа:

- подготовка к проведению обследования;
- предварительное визуальное обследование;
- детальное инструментальное обследование.

Подготовительные работы проводились с целью анализа природно-климатических условий в районе эксплуатации сооружений, конструктивных решений и технологии бетонных работ.

Визуальное обследование проводилось с учетом результатов работы на подготовительном этапе и предусматривало:

- изучение работы бетона в конструкциях в зимний период;
- оценку состояния бетона по внешним признакам в зоне переменного уровня воды;
- анализ возможных причин разрушения бетона;
- систематизацию выявленных разрушений по характерным признакам;
- выбор сооружений для детального обследования конструкций.

Методика изучения работы конструкций в зоне переменного уровня воды основана на постоянном (ежедневном) мониторинге состояния конструкций в зимний период. Это позволило установить ряд особенностей, оказывающих влияние на долговечность бетона, но не учитываемых в настоящее время при проектировании долговечности бетона в условиях морозного воздействия (рис. 3).

Детальное обследование проводилось на трех сооружениях и включало:

- исследование температурного режима бетона в зоне переменного уровня воды;
- отбор проб бетона из различных участков конструкций в зоне переменного уровня с целью дальнейших лабораторных исследований;
- определение механических и физических свойств бетона непосредственно в конструкциях.

Физико-механические свойства бетона: прочность, морозостойкость, водонепроницаемость, водопоглощение, пористость, вещественный состав бетона определяли стандартными методами.

Химический анализ материалов проводился с применением стандартных и нестандартных методов, применяемых при аналогичных исследованиях, для определения агрессивности морской воды к бетону. Глубину проникновения хлорид-ионов, например, определяли по вещественному составу и дополнительно – с помощью метода изменения цвета бетона.

Выводы

Объектами при натурных исследованиях являются бетонные конструкции портовых сооружений, работающие в зоне переменного уровня воды на побережье юга о. Сахалин. Методология оценки объектов исследований построена для достижения поставленной цели – уточнить реальную работу бетона в зоне переменного уровня воды при морозном воздействии и на основе изучения опыта строительства и эксплуатации портовых сооружений определить критические показатели внешних воздействий и бетона, влияющих на долговечность бетона в зоне переменного уровня воды.

Список литературы

1. Malyuk V.V. Prognostication of concrete constructions durability based on experience in building and exploitation of maritime coast-protecting structures on Sakhalin Island (on the issue of determining the estimated lifetime of maritime structures). *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 265. 02014. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926502014>
2. Malyuk V.V. Degradation and sudden failure of concrete structures of marine hydraulic structures in severe hydrometeorological conditions. *Far East Con-2018. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern technologies IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 463. 022071. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/2/022071>
3. Малюк В.В. Прогнозирование долговечности конструкций морских гидротехнических сооружений из бетона по опыту строительства и эксплуатации в суровых климатических условиях. *Проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: Материалы VIII Национальной конференции с международным участием*. Саратов, 2018. С. 223–231.
4. Малюк В.В., Леонович С.Н., Будревич Н.А. Прогноз долговечности морских берегозащитных сооружений. *Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: Сборник научных статей XXI Международного научно-методического семинара*. Брест. 25–26 октября 2018. С. 334–337.
5. Малюк В.В., Леонович С.Н., Будревич Н.А. Морские гидротехнические сооружения: деградационный и внезапный отказ конструкционного бетона. *Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: Сборник научных статей XXI Международного научно-методического семинара*. Брест. 25–26 октября 2018. С. 328–333.
6. Малюк В.В., Леонович С.Н., Будревич Н.А. Конструкционный бетон морских гидротехнических сооружений: деградационный и внезапный отказ. *Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: электронный сборник статей международной научной конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета*. Новополоцк. 5–6 апреля 2018. С. 70–76.
7. Малюк В.В., Леонович С.Н., Будревич Н.А. Расчетный срок службы морских берегозащитных сооружений. *Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: электронный сборник статей международной*

References

1. Malyuk V.V. Prognostication of concrete constructions durability based on experience in building and exploitation of maritime coast-protecting structures on Sakhalin Island (on the issue of determining the estimated lifetime of maritime structures). *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 265. 02014. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926502014>
2. Malyuk V.V. Degradation and sudden failure of concrete structures of marine hydraulic structures in severe hydrometeorological conditions. *Far East Con-2018. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern technologies IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 463. 022071. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/2/022071>
3. Malyuk V.V. Forecasting the durability of structures of offshore hydraulic structures made of concrete based on the experience of construction and operation in harsh climatic conditions. *Problems and prospects for the development of construction, heat and gas supply and energy supply: Materials of the VIII National Conference with international participation*. Saratov. 2018, pp. 223–231. (In Russian).
4. Malyuk V.V., Leonovich S.N., Budrevich N.A. Forecast of the durability of marine coastal protection structures. *Promising directions of innovative development of construction and training of engineering personnel: a collection of scientific articles of the XXI International Scientific and Methodological Seminar*. Brest. 25–26 October 2018, pp. 334–337. (In Russian).
5. Malyuk V.V., Leonovich S.N., Budrevich N.A. Offshore hydraulic structures: degradation and sudden failure of structural concrete. *Promising directions of innovative development of construction and training of engineering personnel: a collection of scientific articles of the XXI International Scientific and Methodological Seminar*. Brest. 25–26 October 2018, pp. 328–333. (In Russian).
6. Malyuk V.V., Leonovich S.N., Budrevich N.A. Structural concrete of offshore hydraulic structures: degradation and sudden failure. *Architectural and construction complex: problems, prospects, innovations: electronic collection of articles of the international scientific conference dedicated to the 50th anniversary of Polotsk State University*. Novopolotsk. 5–6 April 2018, pp. 70–76. (In Russian).
7. Malyuk V.V., Leonovich S.N., Budrevich N.A. Estimated service life of offshore coastal protection structures. *Architectural and construction complex: problems, prospects, innovations: electronic collection of articles of the international scientific conference*

- научной конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета. Новополоцк. 5–6 апреля 2018. С. 77–82.
8. Малюк В.В. Морозостойкость бетона при различных методах испытаний / В.В. Малюк // Проблемы современного строительства: материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 28 мая 2019 г. Белорусский национальный технический университет. Минск: БНТУ, 2019. С. 246–256. <https://rep.bntu.by/handle/data/60615>
9. Малюк В.В. Концепция долговечности бетона для прогноза срока службы конструкций в условиях морозного воздействия. *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2020. № 4 (45). С. 105–115.
10. Malyuk V.V. Longevity of concrete maritime structures in harsh service environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1079. Chapter 1. 022017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/2/022017>
11. Малюк В.В., Митина В.И. Стабильность технологических показателей бетонной смеси с воздухововлекающими добавками при длительной транспортировке. *Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: Сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию ФГБОУ ВО «СибАДИ»*. Омск, 2021. С. 569–574.
12. Шалый Е.Е. Анализ деградации бетона сооружений на острове Сахалин // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. № 1 (34). 2018. С. 65–76.
13. Малюк В.В., Малюк В.Д. Механизмы замораживания бетона в зоне переменного уровня воды портовых сооружений. *Far East Con-2021*.
14. Шалый Е.Е., Леонович С.Н., Ким Л.В. Деградация железобетонных конструкций морских сооружений от совместного воздействия карбонизации и хлоридной агрессии // *Строительные материалы*. 2019. № 5. С. 67–72. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-67-72>
15. Малюк В.В. Прогнозирование долговечности конструкций морских гидротехнических сооружений из бетона по опыту строительства и эксплуатации в суровых климатических условиях. В сборнике: *Проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения. Материалы VIII Национальной конференции с международным участием / Под ред. Ф.К. Абдразакова*. 2018. С. 223–231.
- dedicated to the 50th anniversary of Polotsk State University. Novopolotsk. 5–6 April 2018, pp. 77–82. (In Russian).
8. Malyuk V.V. Frost resistance of concrete under various test methods. 2019.S. 246–256. <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/60615/246-256.pdf?sequence=1> (In Russian).
9. Malyuk V.V. Concrete durability concept for predicting the service life of structures under frost conditions. *Vestnik Inzhenernoy shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*. 2020. No. 4 (45), pp. 105–115. (In Russian).
10. Malyuk V.V. Longevity of concrete maritime structures in harsh service environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1079. Chapter 1. 022017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/2/022017>
11. Malyuk V.V., Mitina V.I. Stability of technological parameters of concrete mix with air-entraining additives during long-term transportation. *Architectural and construction and road transport complexes: problems, prospects, innovations: Collection of materials of the V International scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of FSBEI HE "SibADI"*. Omsk. 2021, pp. 569–574. (In Russian).
12. Shaly E.E. Analysis of concrete degradation of structures on Sakhalin Island. *Vestnik Inzhenernoy shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*. No. 1 (34). 2018, pp. 65–76. (In Russian).
13. Malyuk V.V., Malyuk V.D. Freezing mechanisms for concrete in the zone of variable water level of port facilities. *Far East Con-2021*. (In Russian).
14. Shaly E.E., Leonovich S.N., Kim L.V. Degradation of reinforced concrete structures of marine works from the combined impact of carbonation and chloride aggression. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 5, pp. 67–72. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-770-5-67-72>
15. Malyuk V.V. Forecasting the durability of structures of offshore hydraulic structures made of concrete based on the experience of construction and operation in harsh climatic conditions. *In the collection: Problems and prospects for the development of construction, heat and gas supply and energy supply. Materials of the VIII National Conference with International Participation. Edited by F.K. Abdrazakov*. 2018, pp. 223–231. (In Russian).