

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)

Совершенствование методов проектирования и технологии бетонных работ (на примере о. Сахалин)

Приведены методы проектирования морозостойких и высокоморозостойких бетонов и технологий бетонных работ, применяемых при строительстве портовых сооружений на о. Сахалин. Даны обоснования для совершенствования методов проектирования и технологии бетонных работ с учетом реальной работы бетона в сооружении. Анализ строительства портовых сооружений на о. Сахалин с использованием традиционной и современной технологии бетонных работ позволил выявить преимущества и недостатки традиционной и современной технологий бетонных работ. Показано, что на основе принципов традиционной технологии бетонных работ можно получать бетоны высокой стойкости для конструкций портовых сооружений в условиях морозного воздействия. Принципы современной технологии, основанные на использовании в бетонах добавок-модификаторов для улучшения технологических свойств бетонной смеси и повышения качественных показателей бетона, позволяют повысить морозостойкость на два порядка. Установлено, что наблюдаемые разрушения бетона после первого зимнего сезона связаны с технологическими просчетами, которые не учитывают реальную работу бетона в сооружении. Сравнительный анализ различных технологий бетона, условий работы и показателей его качества в конструкциях позволил установить определяющие качественные показатели внешних воздействий и бетона, которые целесообразно принять за основу совершенствования технологии бетона и формулировки концепции модели долговечности бетона в условиях морозного воздействия.

Ключевые слова: морозостойкость, бетонные работы, проектирование технологии, долговечность, расчетная модель.

Для цитирования: Малюк В.В., Малюк В.Д., Леонович С.Н. Совершенствование методов проектирования и технологии бетонных работ (на примере о. Сахалин) // Бетон и железобетон. 2022. № 2 (610). С. 30–34. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-610-2-30-34>

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)

Improvement of Design Methods and Technology of Concrete Works (on the Example of Sakhalin Island)

The methods of designing frost-resistant and high-frost-resistant concretes and technologies of concrete works used in the construction of port facilities on Sakhalin Island are given. Justifications for improving the design methods and technology of concrete works, taking into account the actual work of concrete construction, are presented. The analysis of the construction of port facilities on Sakhalin Island using traditional and modern technology of concrete works, revealed the advantages and disadvantages of traditional and modern technologies of concrete works. It is shown that on the basis of the principles of traditional technology of concrete works, it is possible to obtain high-resistance concretes for the structures of port facilities in conditions of frost exposure. The principles of modern technology, based on the use of additive-modifiers in concrete to improve the technological properties of the concrete mixture and improve the qualitative indicators of concrete, make it possible to increase frost resistance by two orders of magnitude. It is established that the observed destruction of concrete after the first winter season is associated with technological miscalculations that do not take into account the actual work of concrete in the structure. A comparative analysis of various concrete technologies, working conditions and its quality indicators in structures make it possible to establish the defining qualitative indicators of external influences and concrete, which it is advisable to take as a basis for improving concrete technology and formulating the concept of a concrete durability model in conditions of frost exposure.

Keywords: frost resistance, concrete works, technology design, durability, design model.

For citation: Malyuk V.V., Malyuk V.D., Leonovich S.N. Improvement of design methods and technology of concrete works (on the example of Sakhalin Island). *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 2 (610), pp. 30–34. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-610-2-30-34>

Состояние проблемы. Морозостойкость бетона, как правило, выражается многофакторной зависимостью [1–13]:

$$F_6 = f(V/C; C; T; A, C, D, Z, P), \quad (1)$$

где V/C – водоцементное отношение; C – вид цемента; T – период твердения; A – условия твердения; C – состав бетона; D – структурообразующие добавки; Z – заполнители; P – параметр, характеризующий уровень технологии.

Эта зависимость принята за основу при разработке общей модели морозостойкости. На практике целесообразно выделить определяющие критические параметры бетона для конкретных условий службы, которые обеспечивают требуемую долговечность бетона D_6 на этапе эксплуатации сооружения.

Долговечность бетона D_6 при традиционной технологии определяется тремя критическими параметрами:

$$D_6 = f(V/C; C; \alpha), \quad (2)$$

где α – степень гидратации цемента.

При отработанной технологии бетона повреждение бетонных конструкций носит локальный характер. Основными причинами разрушения являются некачественное уплотнение и расслоение бетонной смеси при использовании высокоподвижных смесей или бетонных смесей с высоким V/C . Следовательно, устойчивость проявления вида разрушения бетона в сооружении может характеризовать не только общий уровень технологии, т. е. параметр P в общей зависимости (1), но и установить определяющий параметр, влияющий на долговечность. Анализ технологий, применяемых на строительных площадках, показывает, что низкая обеспеченность предельно допустимых значений V/C наблюдается при изготовлении бетонной смеси в условиях строительной площадки, когда применяется местный песок и его обогащение осуществляется путем промывки. В этом случае сложно контролировать и корректировать содержание воды в бетонной смеси. Это соответственно влияет на стабильность параметра V/C , который косвенно контролируется по подвижности. Однако наиболее сложно в условиях строительной площадки обеспечить нормальные условия вызревания бетона, т. е. требуемую степень гидратации цемента в бетоне α к моменту морозного воздействия. Поэтому определяющим критическим параметром в этих условиях является параметр α .

Результаты исследования показали, что бетоны, изготовленные по обычной технологии, т. е. без применения добавок ПАВ, способны обеспечить без ремонта эксплуатационную надежность конструкциям в течение ста лет.

Направления применения современных технологий бетонных работ. Современная технология бетонных работ, основанная на применении добавок ПАВ, существенно расширяет технологические возможности и позволяет:

- увеличить срок живучести бетонной смеси для перевозки на большие расстояния;
- применять высокоподвижные бетонные смеси;
- снизить чувствительность к качеству заполнителей и цементу.

Современная технология связана с применением воздухововлекающих добавок, и долговечность бетона D_6 определяется четырьмя критическими параметрами:

$$D_6 = f(V/C; C; BV, \alpha). \quad (3)$$

Результаты исследований показывают, что, несмотря на высокую эффективность воздухововлекающих добавок для повышения морозостойкости, при этой технологии также определяющим критическим параметром является степень гидратации цемента (α). Следовательно, независимо от технологии бетона, определяющим критическим параметром долговечности бетона в условиях морозного воздействия является степень гидратации цемента. Однако не исключается и факт применения бетонной смеси с V/C , превышающим предельно допустимые значения. Установлено, что при неконтролируемом процессе транспортирования бетонной смеси на большие расстояния возможно добавление воды выше предельно допустимой при перевозке. Рекомендуемые требования по воздухововлечению бетонной смеси для обеспечения морозостойкости технически сложно соблюсти при длительной транспортировке готовой бетонной смеси. Исследования авторов дают основания считать, что в зависимости от условий внешних воздействий существует уровень зрелости структуры бетона, который обеспечивает стойкость бетона в первый зимний период. Этот параметр, очевидно, следует рассматривать в качестве определяющего критического параметра для периода иницирования, поскольку этот период характеризует долговечность. В качестве критической (эталонной) зрелости ($P_{кр}$) авторами приняты структурные характеристики бетона, сформированные при нормальных условиях твердения, определенные в стандартных испытаниях бетона. Исходя из этого косвенными параметрами критической зрелости структуры бетона являются основные параметры режима твердения в соответствии с действующими нормативными документами: продолжительность твердения 28 сут (T_{28}), температура среды $+15^\circ\text{C}$ (t_{15}) и влажность среды не менее 95% (P_{95}), т. е. эти параметры $P_{кр}=1$. Реальная технология бетона на строительной площадке не всегда способна обеспечить нормативные параметры режи-

ма твердения. Эта проблема особенно остро стоит при строительстве в климатических районах Севера и Дальнего Востока РФ. Поэтому случаи преждевременного разрушения бетона в основном следует связывать с тем, что уровень фактической зрелости структуры (Π_Φ) не соответствует уровню критической зрелости, т. е. ($\Pi_\Phi < \Pi_{кр}$). Уровень зрелости структуры бетона определяет его способность к водонасыщению, а значит, и развитие процессов в период иницирования и деградации. В процессе твердения бетона из трех выделенных параметров режима: (T_{28}), (t_{15}) и (P_{95}) – любой может иметь определенное несоответствие. Поэтому для практики важно установить значимость параметров (T_{28}), (t_{15}) и (P_{95}) и технологическую возможность снизить чувствительность морозостойкости бетона к параметру $\Pi_{кр}$.

Известно, что проблема обеспечения долговечности бетона конструкций транспортных и морских гидротехнических сооружений на Дальнем Востоке с начала 70-х гг. прошлого века решается путем повышения морозостойкости. Это направление сохраняется как в России, так и за рубежом в настоящее время. Анализ показывает, что современный этап, основанный на применении высокофункциональных бетонов «High Performance Concrete», также сохраняет это направление в разработке долговечности бетона при морозных воздействиях.

Влияние технологии изготовления ЖБК на повреждаемость. Результаты проведенных исследований долговечности бетона портовых сооружений на о. Сахалин позволили установить потенциальные возможности обычного (бездобавочного) бетона и необходимость совершенствования технологии бетона с добавками ПАВ на основе оптимизации воздухововлечения и применении комплексных добавок для снижения чувствительности бетона к длительному морозному воздействию.

Авторами установлено, что вид повреждений и устойчивость его проявления главным образом зависят от уровня организации технологии изготовления конструкций. Требуемый уровень должен надежно обеспечиваться на всех технологических переделах, однако для бетона зоны переменного уровня особое внимание должно уделяться обеспеченности предельно допустимых значений в условиях твердения бетона в конструкции, В/Ц и Ц.

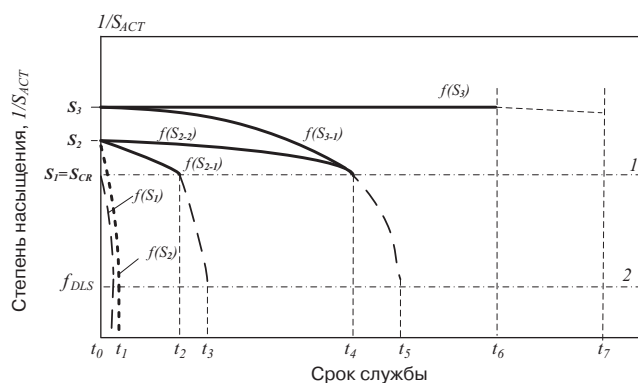
Критическими параметрами технологии бетона для портового строительства следует принимать водоцементное отношение (В/Ц), содержание цемента (Ц), искусственное содержание воздуха в бетоне (ВВ), уровень зрелости структуры бетона в конструкции ($\Pi_{кр}$), т. е.:

$$D_6 = f(V/C; C; BB, \Pi_{кр}). \quad (4)$$

Практическое значение имеет определение значимости каждого из выделенных критических параметров для долговечности, а их значимость будет зависеть от механизма замораживания бетона в конструкции.

Результаты исследований показывают, что совершенствование технологии бетона для портового строительства в условиях Севера и Дальнего Востока должно идти в направлении оптимизации воздухововлечения в бетоне и разработки способов снижения чувствительности бетона к длительному замораживанию в условиях, когда трудно обеспечить $\Pi_\Phi = \Pi_{кр}$ во время строительства.

Концепция расчетной модели долговечности. Сформулирована концепция для разработки расчетной модели долговечности, основанием для которой являются результаты проведенных исследований по уточнению реальных механизмов замораживания бетона в конструкциях портовых сооружений. Концепция схематически представлена на рисунке и является развитием концепции, принятой для разработки программы исследований настоящей работы. За основу приняты возможные процессы деградации бетона, зависящие от механизмов его замораживания в зоне переменного уровня. Определяющим критическим показателем долговечности в конкретных условиях эксплуатации является степень насыщения пор бетона S_{ACT} . При этом косвенными показателями этого параметра являются В/Ц; Ц; ВВ, $\Pi_{кр}$. Исходя из того, что в зоне переменного уровня наблюдается два механизма замораживания, на схеме рисунка представлены процессы деградации с учетом этих механизмов на двух характерных участках зоны переменного уровня:



Концепция долговечности бетона в зоне переменного уровня воды морских портовых сооружений при морозных воздействиях: 1 – предельный уровень долговечности; 2 – предельный уровень эксплуатационных характеристик. Зависимости $f(S_1)$; $f(S_2)$; $f(S_3)$ для условий эксплуатации $S_{ACT} = f(t_F, T_F)$; зависимости $f(S_1)$; $f(S_2-1)$; $f(S_2-2)$; $f(S_3-1)$; для условий эксплуатации $S_{ACT} = f(t_F, T_F; N_{FT}, T_F, T_T)$

The concept of durability of concrete in the zone of variable water level of seaport facilities under frost impact: 1 – limiting level of durability; 2 – the limiting level of performance. Dependencies $f(S_1)$; $f(S_2)$; $f(S_3)$ for operating conditions $S_{ACT} = f(t_F, T_F)$; dependencies $f(S_1)$; $f(S_2-1)$; $f(S_2-2)$; $f(S_3-1)$; for operating conditions $S_{ACT} = f(t_F, T_F; N_{FT}, T_F, T_T)$

– для участка А критическими параметрами внешних воздействий является температура замораживания (t_F), количество циклов ПЗО в зимний период (N_{FT}), продолжительности замораживания T_F и оттаивания T_T , т. е. $S_{ACT}^2 = f(t_F; t_T; N_{FT}; T_F; T_T)$;

– для участков В и С критическими параметрами внешних воздействий являются температура замораживания (t_F) и продолжительность замораживания (T_F), т. е. $S_{ACT}^1 = f(t_F, T_F)$. Исходя из основных теоретических положений о механизмах морозного разрушения, кинетика насыщения бетона зависит от механизмов замораживания (S_{ACT}^1 или S_{ACT}^2) и структурной зрелости бетона (Π_{KP});

– при $S_{ACT} = S_{CR}$ независимо от механизма замораживания будет происходить внезапный отказ – $f(S_1)$, разрушение будет происходить после первого замораживания, т. е. периода иницирования у бетонов не будет;

– при $S_{ACT} < S_{CR}$ долговечность зависит от уровня зрелости структуры бетона Π_{KP} и механизма замораживания бетона; величины этих параметров определяют период иницирования, который может иметь продолжительность t_0-t_2 или t_0-t_4 .

Для условий замораживания $S_{ACT}^1 = f(t_F, T_F)$, например, когда при начальном насыщении S_2 через временной промежуток t_0-t_2 происходит повышение водонасыщения до критического уровня ($S_2 = S_{CR}$),

разрушение произойдет после первого зимнего периода. На рисунке это соответствует кривой $f(S_2)$. В этом случае повышение S_2 до S_{CR} может происходить в результате перераспределения свободной воды к границе промерзания при длительном замораживании.

В условиях $S_{ACT}^2 = f(t_F; t_T; N_{FT}; T_F; T_T)$ бетон с уровнем насыщения $S_2 < S_{CR}$ при $\Pi_{KP} < 1$ способен сопротивляться циклам ПЗО, поскольку исследования показали, что циклическое действие приливов создает благоприятные условия для дальнейшей гидратации цементного камня. Однако при критической зрелости структуры бетона, т. е. при $\Pi_{KP} = 1$, считают теоретически возможным обводнение пор бетона до критической степени S_{CR} в условиях многократного циклического замораживания и оттаивания. На рисунке кривая $f(S_{3-1})$ иллюстрирует случай обводнения воздушных пор бетона при использовании воздухововлекающих добавок ПАВ.

Выводы. Представленная концепция долговечности позволяет определить направления исследований, которые позволят выявить критические показатели для разработки модели долговечности. Если исходить из того, что в зоне переменного уровня преобладают два механизма морозного разрушения бетона, то целесообразно определять критические показатели для моделей долговечности с учетом этих теоретических положений.

Список литературы

1. Malyuk 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. 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. Малу́к 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*. 2018. С. 223–231.
4. Малу́к 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*

References

1. Malyuk 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. 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 marine 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: Proceedings of the VIII National Conference with international participation*. 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. *Perspective directions of innovative development of construction and training of engineering personnel: a collection of scientific articles of the XXI International*

- XXI Международного научно-методического семинара. Брест, 25–26 октября 2018. Ч. 1. 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. Ч. 1. 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: Электрон. сборник статей международной научной конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета*. Новополоцк. 5–6 апреля 2018 г. С. 70.
7. Малюк В.В. Морозостойкость бетона при различных методах испытаний. *Проблемы современного строительства: материалы Международной научно-технической конференции*. Минск. 28 мая 2019 г. С. 246–256.
8. Malyuk V.V. Longevity of concrete maritime structures in harsh service environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1079. Chapter 1. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/2/022017>
9. 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. 3–4 декабря 2020 г.
10. 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.
11. 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.
12. Malyuk V.V., Malyuk V.D., Lobodyuk A.V. Operating conditions and damage to the concrete of port facilities on the southern coast of Sakhalin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. «International Science and Technology Conference «Earth Science»». ISTC EarthScience 2022 – Chapter 4. 2022. 052035.
13. Malyuk V.V., Malyuk V.D. Freezing mechanisms of the concrete in an area of variable water level of port facilities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. «International Science and Technology Conference «Earth Science»». ISTC EarthScience 2022 – Chapter 4. 2022. 052020.
- Scientific and Methodological Seminar*. Brest, October 25–26, 2018. Part 1, pp. 334–337. (In Russian).
5. Malyuk V.V., Leonovich S.N., Budrevich N.A. Off-shore hydraulic structures: degradation and sudden failure of structural concrete. *Perspective 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. October 25–26, 2018. Part 1, pp. 328–333. (In Russian).
6. Malyuk V.V., Leonovich S.N., Budrevich N.A. Structural concrete of marine hydraulic structures: degradation and sudden failure. *Architectural and building complex: problems, prospects, innovations: electron. collection of articles of the international scientific conference dedicated to the 50th anniversary of Polotsk State University*. Novopolotsk. April 5–6, 2018, p. 70. (In Russian).
7. Malyuk V.V. Frost resistance of concrete under various test methods. *Problems of Modern Construction: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. Minsk. May 28, 2019. pp. 246–256. (In Russian).
8. Malyuk V.V. Longevity of concrete maritime structures in harsh service environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1079. Chapter 1. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/2/022017>
9. Malyuk V.V., Mitina V.I. Stability of technological parameters of concrete mixture 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 FGBOU VO «SibADI»*. Omsk. December 3–4, 2020. (In Russian).
10. Malyuk V.V. The concept of concrete durability for predicting the service life of structures under frost exposure. *Vestnik Inzhenernoy shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*. 2020. No. 4 (45), pp. 105–115. (In Russian).
11. 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).
12. Malyuk V.V., Malyuk V.D., Lobodyuk A.V. Operating conditions and damage to the concrete of port facilities on the southern coast of Sakhalin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. «International Science and Technology Conference «Earth Science»». ISTC EarthScience 2022 – Chapter 4. 2022. 052035.
13. Malyuk V.V., Malyuk V.D. Freezing mechanisms of the concrete in an area of variable water level of port facilities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. «International Science and Technology Conference «Earth Science»», ISTC EarthScience 2022 – Chapter 4. 2022. 052020.