

**Корсун Андрей Михайлович**, магистр техн. наук, младший научный сотрудник, Научно-исследовательская испытательная лаборатория бетонов и строительных материалов, Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Беларусь)

**Батяновский Эдуард Иванович**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Беларусь)

## **МОРОЗОСТОЙКОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО БЕТОНА ВО ВЗАИМОСВЯЗИ С ИСКУССТВЕННО СОЗДАВАЕМОЙ ПОРИСТОСТЬЮ**

© РУП «Институт БелНИИС», 2018  
Institute BelNIIS RUE, 2018

### **АННОТАЦИЯ**

*В статье рассматривается влияние знакопеременных температур на физико-механические свойства бетона, приготовленного с использованием разных химических добавок для повышения морозостойкости. Представлены результаты лабораторных исследований по повышению морозостойкости цементного бетона, показывающие возможность обеспечения высокой морозостойкости без применения воздухововлекающих добавок за счет увеличения плотности и непроницаемости структуры.*

*Экспериментально показано, что введение воздухововлекающих добавок, обладающих дополнительным эффектом гидрофобизации, эффективно с позиции обеспечения морозостойкости бетона относительно низких классов (до С30/37), прочностью на сжатие до 50 МПа и водопоглощением по массе более 4,0 %. Морозостойкость бетона большей непроницаемости и прочности целесообразно повышать, наращивая эти показатели, в частности, за счет максимального снижения начального водосодержания и качественного уплотнения. Этот вывод экспериментально подтверждают приведенные в статье данные, так как «механизм» морозной деструкции цементного бетона многофакторный, а*

*рост его плотности (непроницаемости) и прочности обеспечивают более высокую способность сопротивляться «силовым» воздействиям, связанным с многократно повторяющимися знакопеременными деформациями, накоплением усталостных явлений, гидродинамики фильтрации жидкости под влиянием изменяющихся температурных полей и пр.*

*В исследованиях для оценки морозостойкости применялся стандартный 3-й метод по ГОСТ 10060.1-95 ... ГОСТ 10060.4-95; другие испытания выполнены по действующей нормативно-технической документации.*

*В результате исследований показано, что использование в бетоне воздухововлекающих добавок совместно с пластификаторами способно обеспечить его морозостойкость вплоть до марок «F200» ... «F300» при испытаниях в солевой среде. Однако для дальнейшего повышения морозостойкости бетона необходимо добиваться одновременного повышения его плотности и непроницаемости наряду с высокой прочностью. Оптимальное сочетание этих факторов способно обеспечить устойчивость цементного бетона к комплексному воздействию деструктивных эксплуатационных факторов.*

**Ключевые слова:** бетон, добавка, морозостойкость, пористость, плотность, непроницаемость, прочность.

**Для цитирования:** Корсун, А. М. Морозостойкость цементного бетона во взаимосвязи с искусственно создаваемой пористостью / А. М. Корсун, Э. И. Батяновский // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2018. – Вып. 10. – С. 169–184. <https://doi.org/10.23746/2018-10-11>

**Andrei Korsun**, Master in Engineering Science, Junior Researcher, research and testing laboratory of concrete and building materials, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

**Eduard Batyanovskiy**, DSc in Engineering Science, Professor, Head of the department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

# **FROST RESISTANCE OF CEMENT CONCRETE IN RELATION TO ARTIFICIALLY CREATED POROSITY**

## **ABSTRACT**

*The article discusses the effect of alternating temperatures on the physic and mechanical properties of concrete, made using different chemical additives to improve cold resistance. The results of laboratory studies to improve the frost resistance of cement concrete, showing the possibility of providing high frost resistance without the use of air-entraining additives by increasing the density and impermeability of the structure are presented.*

*It was experimentally shown that the introduction of air-entraining additives with an additional hydrophobization effect is effective from the standpoint of ensuring the frost resistance of concrete of relatively low classes (up to C30 / 37), compressive strength up to 50 MPa and water absorption by weight more than 4.0 %. The frost resistance of concrete of greater impermeability and strength is advisable to increase by increasing these indicators, in particular, by minimizing the initial water content and quality compaction. This conclusion is experimentally confirmed by the data given in the article, since the “mechanism” of frost destruction of cement concrete is multifactorial, and the growth of its density (impenetrability) and strength provides a higher ability to resist “force” effects associated with repeatedly repeated alternating deformations, accumulation of fatigue phenomena, hydrodynamics of fluid filtration under the influence of changing temperature fields and others.*

*In studies, the standard 3rd method according to GOST 10060.1-95 was used to evaluate frost resistance ... GOST 10060.4-95; other tests are performed according to the current regulatory and technical documentation.*

*As a result of the research, it was shown that the use of air-entraining additives in combination with plasticizers in concrete is capable of ensuring its frost resistance up to the “F200” ... “F300” marks when tested in a salt medium. However, to further increase the frost resistance of concrete, it is necessary to achieve a simultaneous increase in its density and impermeability along with high strength. The optimal combination of these factors is able to ensure the stability of cement concrete to the complex effect of destructive operating factors.*

**Keywords:** concrete, additive, frost resistance, porosity, density, impermeability, strength.

**For citation:** Korsun A., Batyanovskiy E. Frost resistance of cement concrete in relation to artificially created porosity. *Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete: Collected Research Papers*. Minsk. Institute BelNIIS. Vol. 10. 2018. Pp. 169–184. <https://doi.org/10.23746/2018-10-11> (in Russian)

## ВВЕДЕНИЕ

Теоретические аспекты морозной деструкции бетона. Морозостойкость – один из основных показателей, по которому оценивают ожидаемую долговечность бетонных и железобетонных изделий и конструкций. С целью повышения морозостойкости на основании гипотезы Т. Пауэрса «об интервале пор» [1, 2] в бетоне создают искусственную замкнутую пористость (добавками СНВ, СДО, кремнийорганических жидкостей и современных «поризаторов», которые фактически получают на основе этих веществ).

Действительно, такие добавки за счет эффекта замкнутой (компрессионной) пористости, эффекта пересекания (уменьшения длины) капилляров, а соответственно – уменьшения капиллярного подсоса и способности бетона сорбировать жидкость, а также за счет гидрофобизации стенок пор и капилляров в бетоне веществом этих добавок способны на 2–3 марки повысить морозостойкость бетона с относительно высокой степенью пористости, особенно низких классов по прочности. Однако «механизм» морозной деструкции бетона гораздо более сложен.

Так, обобщение разнообразных гипотез [3–10], включая основы теории миграции влаги в пористых телах [11, 12], позволяет констатировать, что механизм постепенного разрушения структуры бетона, подвергаемого попеременному замораживанию и оттаиванию в насыщенном водой состоянии, представляет собой комплексное сочетание деструктивных факторов, включая: давление льда при кристаллизации свободной воды; гидродинамические воздействия при ее перемещении (миграции) под влиянием градиента тепла и влагосодержания (термовлагопроводности); гидростатическое давление заземленной в тупиковых порах и дефектах структуры жидкости; напряжения, возникающие от разницы

температурных деформаций составляющих бетона и цементного камня (т. е. на макро- и микроуровне, в зонах контакта как цементного камня с заполнителями, так и между кристаллогидратными новообразованиями в цементном камне); усталостные (постепенно увеличивающиеся) дефекты структуры от многократно повторяющихся знакопеременных деформаций; понижение со временем концентрации растворенных в «поровой» жидкости продуктов гидролиза цемента [13], как за счет образования нерастворимых в воде кристаллогидратов (отражение продолжающейся реакции цемента с водой), так и из-за «подсоса» жидкости развивающимися дефектами структуры в период оттаивания образцов, что увеличивает содержание свободной воды в объеме бетона, и др.

В случае использования хлористых солей-антиобледенителей (как это имеет место при эксплуатации, например, дорожных покрытий и мостостроительных конструкций) или испытательных солевых растворов (в процессе испытаний бетона на морозостойкость в 5 %-ном растворе NaCl) действие означенных факторов на бетон дополняется [14–21]: кристаллизационным давлением накопившейся соли, образовавшейся в результате перенасыщения ее раствора в малых по объемам дефектах структуры цементного камня, а также в зонах его контакта с заполнителями в бетоне и в порах (трещинах) зерен заполнителя; усилением процесса миграции жидкой фазы и ростом влагоемкости бетона; возникающим напряженным состоянием на уровне микроструктуры цементного камня из-за локально проявляющегося эффекта от перепада (градиента) температур, сопровождающего процесс «очагового» растворения – кристаллизации соли; понижением температуры замерзания раствора соли в сравнении с водой, что способствует глубокому проникновению жидкой фазы в дефекты структуры все меньшего сечения, углубляет развитие процесса массопереноса соли и усиливает эффект деструкции бетона в целом.

В реальных условиях эксплуатации (например, дорожных покрытий) разрушающее воздействие солей-антиобледенителей не прекращается и при положительной температуре окружающей среды. Попеременное увлажнение-высушивание, изменение температуры (даже в пределах суток) вызывают соответствующие многократно повторяющиеся деформации бетона, побуждают проявление процессов растворения – кристаллизации попавшей в его поры соли с образованием кристаллогидратов,

увеличивающихся в объеме, а также эндокринного эффекта, то есть сопровождается постоянным деструктивным воздействием на бетон. Оно дополняется тем, что бетон разнообразных дорожных покрытий подвергается интенсивному механическому воздействию: истирающим, сжимающим, изгибающим, ударным нагрузкам различной интенсивности и значений, которые многократно повторяются во времени, приводят к ускоренной морозной деструкции бетона [22]. Успешно сопротивляться такому комплексному химико-физическому воздействию способен только бетон высокой плотности, непроницаемости и прочности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ МОРОЗОСТОЙКОСТИ БЕТОНА

На начальном этапе исследований выявили влияние ряда воздуховлекающих добавок на свойства бетона, связанные с показателем его морозостойкости (табл. 1). Эти эксперименты выполнены на образцах мелкозернистого (цементно-песчаного) бетона постоянного номинального состава (цемент – 500 кг, песок (мытый, Мк ~ 2,6) – 1 600 кг, вода – 160...170 кг; при одинаковой жесткости бетонной смеси ~ 20...25 с) на материалах, соответствующих требованиям действующей нормативно-технической документации. Химические добавки вводили с водой затворения в дозировке, рекомендуемой их производителями (табл. 1).

Таблица 1

### Характеристики бетона с добавками

Добавка		Относительные величины характеристик бетона		
Вид	Дозировка, % от МЦ	Прочность на сжатие, %, МПа	Водопоглощение по массе, % (%)	Морозостойкость, %, после 28 циклов
Без добавок	–	100 (52)	100 (4,4)	100
Plastolith-A	0,025	85	95	100
Вибропор Ж35	0,075	79	93	95
Софлексил60-80	0,1	72	84	91
Стахемент-F	0,5	114	95	110*
СНВ	0,005	77	85	95
ЩСПК	0,3	85	89	95

\* Эксперимент прекращен, но образцы – без признаков разрушения структуры.

Результаты эксперимента, выполненного при соблюдении правила «прочих равных условий», свидетельствуют, что ряд добавок (Софексил 60-80; ЦСПК и СНВ), обеспечив снижение начального водопоглощения, но одновременно и прочности, в итоге не повысили, а снизили показатель морозостойкости. Причина в росте пористости бетона, что в итоге отразилось в росте водопоглощения после 3–5 циклов замораживания-оттаивания, а также в снижении прочности бетона при их введении в состав, то есть в снижении способности бетона сопротивляться механическим (деформационным) и иным (см. введение) разрушающим факторам.

Необходимо отметить, что, несмотря на начальное снижение водопоглощения бетона за счет введения в состав этих добавок, вещество которых способствует, с одной стороны, вовлечению воздуха (в виде замкнутых сфер, рассекающих (кроме прочего) каналы капиллярной пористости, снижающих величину капиллярного подсоса бетона и его водопоглощения), а с другой – проявляют эффект гидрофобизации стенок капилляров (и других дефектов структуры цементного камня и бетона в целом), их эффективность проявляется только на начальном этапе испытаний на морозостойкость и, соответственно, на начальном этапе эксплуатации изделий (конструкций).

После 5–6 циклов замораживания (при  $t \geq (-50...-55)$  оС) и оттаивания (что соответствует  $\geq 75$  циклов базовых испытаний бетонов дорожных покрытий) действие гидрофобизации фактически прекращается и в бетоне начинает «работать» весь физический (фактический) объем его пористости, включая и искусственно созданную пористость за счет воздухововлечения добавок.

В результате через  $n$ -ное количество испытательных (или эксплуатационных, естественных) циклов начинает возрастать водопоглощение бетона, то есть увеличивается объем проникающей в его поры воды со всеми вытекающими деструктивными последствиями: возрастающим давлением при замерзании воды, ростом знакопеременных деформаций, накоплением усталостных явлений, нарастающим солевым воздействием и т. д. Бетон ускоренно разрушается, так как при введении указанных добавок его прочность существенно снижается (на 15...30 %, табл. 1), а значит, снижается и способность к сопротивлению физико-механическим деструктивным явлениям.

Очевидно, что безусловная эффективность воздухововлекающих, гидрофобизирующих добавок в тяжелых бетонах низких классов (прочностью менее 40...50 МПа, т. е. со структурой с достаточно высокой открытой пористостью, характеризующейся водопоглощением бетона без добавок 4,0 % и более по массе) не подтверждается в бетонах более плотных и прочных. В последнем случае целесообразно использовать добавки (например, качественные пластификаторы) с целью повышения плотности (непроницаемости) и прочности бетона, что подтверждают экспериментальные данные таблицы 1, относящиеся к введению в бетон (с понижением его водосодержания), например, суперпластификатора «Стахемент-Ф». Способствуя снижению водосодержания бетона при сохранении консистенции смеси, необходимой для качественного уплотнения, эти добавки обеспечивают рост плотности, непроницаемости и прочности бетона, то есть все необходимые предпосылки для повышения его морозостойкости и долговечности.

Изложенное экспериментально подтверждено применительно к оценке изменений прочности и устойчивости в процессе испытаний на морозостойкость бетона составов, аналогичных примененным при строительстве 2-й кольцевой минской дороги (табл. 2 и 3). В исследованиях использовали материалы для бетона, аналогичные применявшимся при ее строительстве.

Таблица 2

**Составы бетона со средней плотностью**

Состав	Цемент, кг/м <sup>3</sup>	Песок, кг/м <sup>3</sup>	Щебень, кг/м <sup>3</sup>	Вода, кг/м <sup>3</sup>	Пластификатор, кг/м <sup>3</sup>	Микрокремнезем, кг/м <sup>3</sup>	Микропоран, кг/м <sup>3</sup>	Плотность смеси, кг/м <sup>3</sup>
1. Микропоран + Стахемент 2010	430,0	697	1 117	162	2,15	0	0,301	2 423
2. Реламикс ПК	430,0	697	1 117	120	6,45	0	0	2 590
3. Стахемент 2000М	430,0	697	1 117	130	4,30	0	0	2 515
4. Реламикс ПК + 5 % МК	408,5	697	1 117	120	6,45	21,5	0	2 627

Состав	Цемент, кг/м <sup>3</sup>	Песок, кг/м <sup>3</sup>	Щебень, кг/м <sup>3</sup>	Вода, кг/м <sup>3</sup>	Пластификатор, кг/м <sup>3</sup>	Микрокремнезем, кг/м <sup>3</sup>	Микропоран, кг/м <sup>3</sup>	Плотность смеси, кг/м <sup>3</sup>
5. Реламикс ПК + 10 % МК	387,0	697	1 117	140	2,15	43,0	0	2 644

Особенностью эксперимента было сопоставление примененного при этом состава (№ 1) бетона (цемента – 430 кг, песка – 697 кг, щебня (фр. 5...20 мм) – 1 117 кг, подвижность смеси марки «П1»), включающего пластификатор и воздухововлекающую добавку (табл. 2), и составов № 2 и № 3, включающих пластифицирующую добавку без введения воздухововлекающей, при прочих равных условиях: расходу твердофазных материалов и консистенции (подвижности) смеси. Основное отличие было в формирующейся структуре бетона – с созданием дополнительной пористости за счет введения воздухововлекающей добавки и без нее. В составы № 4 и № 5 с исследовательской целью был снижен на 5 % и 10 % расход цемента, взамен ввели равное количество микрокремнезема.

Таблица 3

### Результаты испытаний

№ состава	Введенная добавка, % от МЦ*	В/Ц, доли ед.	Плотность смеси, кг/м <sup>3</sup>	Прочность бетона, МПа после циклов испытаний					
				0	10	20	30	50	60
1	Стахемент 2010 (0,5 %) Микропоран (0,07 %)	0,37	2 423	47,5	47,8	47,7	31,3	18,9	–
2	РеламиксПК (1,5 %)	0,27	2 590	80,0	83,0	91,5	72,1	46,5	27,5
3	Стахемент2000М (1 %)	0,30	2 515	69,0	69,7	69,0	63,5	28,2	15,2
4	РеламиксПК (1,5 %) + 5 %МК	0,29	2 627	80,4	78,1	75,7	63,2	30,0	18,2
5	РеламиксПК (1,5 %) + 10 %МК	0,36	2 644	88,3	86,4	84,9	67,2	33,9	19,1

\* в процентах от массы цемента при дозировке в виде раствора.

Из данных таблицы 3 очевидно существенное снижение прочности бетона (как в начале испытаний, так и после 30 циклов (на  $\geq 34$  %) при введении в состав воздухововлекающей добавки в виде микропорана. Кроме этого, водопоглощение (по массе) бетона с микропораном составило примерно 5 %, а для составов без этой добавки до (2...2,5) %. Здесь следует отметить, что снижение после 30 циклов прочности бетона с поризующей добавкой до  $\sim 31$  МПа означает полную потерю эксплуатационной надежности. Уровень прочности бетона остальных составов в 60...70 МПа способен обеспечивать ее длительный период. Этот вывод подтверждает визуальная оценка состояния структуры бетона испытанных образцов. К 30 циклам испытаний структура бетона с поризующей добавкой (состав № 1) рыхлая, очевидна ее деструкция по всему объему образцов. Нарушения структуры образцов составов № 2–5 имеются только в поверхностных слоях бетона, то есть деструкция плотного, непроницаемого материала проявляется в частичных нарушениях цементного камня внешнего контура образцов при сохранении исходной (плотной) структуры в объеме бетона после 30, а для состава № 2 – после 50 циклов испытаний.

Кроме отмеченного, очевиден прирост прочности образцов бетона в процессе испытаний состава с высокоэффективным пластификатором («Реламикс ПК»). Необходимо отметить, что в этом случае начальное водосодержание бетона равнялось: (В/Ц)б  $\sim 0,27$ , средняя плотность близка к 2 600 кг/м<sup>3</sup> и водопоглощение по массе  $\leq 2$  %, то есть высока непроницаемость бетона. Выявленный эффект роста прочности особо плотного бетона при циклическом замораживании-оттаивании обоснован в источнике [13] применительно к высокопрочному бетону сухого формирования.

Из результатов исследований (табл. 2 и 3) следует, что введение в состав бетона добавки – поризатора едва ли не в 2 раза (с 80...90 МПа до 45...50 МПа) снизило прочность бетона проектного (28 суток) возраста при проведении экспериментов с соблюдением правила равноподвижности бетонной смеси и «прочих равных условий» по режиму твердения бетона.

Также очевидно, что состав бетона с воздухововлекающей добавкой обеспечил расчетный уровень морозостойкости, соответствующий марке «F200» и установленной по действующим для бетона дорожного назначения правилам.

Одновременно экспериментальные данные свидетельствуют о том, что бетон без воздухововлекающей добавки, но с использованием эффективного пластификатора (в частности «Реламикс ПК»), обеспечившего существенный рост плотности, непроницаемости и прочности, только после 50...55 циклов снизил прочность до уровня 40...45 МПа. Можно ожидать, что в эксплуатационных условиях дорожного полотна материал с таким уровнем прочности обеспечит ему эксплуатационную надежность. Результаты экспериментов, относящиеся к использованию микрокремнезема в бетоне не однозначны. Эти исследования продолжаются и их результаты будут представлены в последующих публикациях.

Здесь необходимо отметить, что оценка морозостойкости цементного бетона по снижению прочности на 5 % от исходной для высокопрочного бетона нерациональна. Очевидно, что снижение прочности от 80...90 МПа и более на 5 % (т. е. на 4,0...4,5 МПа) при практически полном сохранении структуры и целостности материала, а также прочности на уровне в 75...85 МПа не соотносится с потерей эксплуатационной надежности. Очевидно, что такой бетон будет обеспечивать ее длительный период. В этой связи представляется необходимым в современных условиях критически переоценить требования действующих нормативов об обязательном введении в состав бетона дорожного назначения воздухововлекающих добавок. Естественно, что для этого необходимо провести многоплановые и объемные исследования проблемы повышения морозостойкости бетона с учетом возможностей, которые обеспечивают современные химические и минеральные добавки.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Введение в состав бетона воздухововлекающих добавок безусловно способно обеспечить его морозостойкость на уровне марки «F200» и даже «F300» при испытаниях в солевой среде.

С целью дальнейшего повышения морозостойкости бетона рационально добиваться одновременного повышения его плотности и непроницаемости наряду с высокой прочностью. Оптимальное сочетание этих факторов способно обеспечить устойчивость цементного бетона к комплексному воздействию

деструктивных эксплуатационных факторов, в том числе с учетом их усиления за счет постоянно действующих механических нагрузок, которые должен выдерживать, например, бетон дорожных покрытий.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Powers, T. C. Working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete / T. C. Powers // J. Am. Coner. Inst. 1945. – N 4. – V. 16.
2. Powers, T. C. Theory of volume changes in hardened portland cement paste during freezing / T. C. Powers, R. A. Helmut // Proceedings Higway Research Board. – 1953. – V. 32.
3. Горчаков, Г. И. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений / Г. И. Горчаков, М. М. Капкин, Б. Г. Скрамтаев. – М.: Стройиздат, 1965. – 195 с.
4. Шестоперов, С. В. Цементный бетон в дорожном строительстве / С. В. Шестоперов. – М.: Дориздат, 1950. – 132 с.
5. Стольников, В. В. Исследования по гидротехническому бетону / В. В. Стольников. – М.: – Л.: Госэнергоиздат. 1953. – 330 с.
6. Шейкин, А. Е. Цементные бетоны высокой морозостойкости / А. Е. Шейкин, Л. М. Добшиц. – Л.: Стройиздат, 1989. – 128 с.
7. Попов, Н. Д. К вопросу об усталости бетона при многократных циклах чередующихся воздействий окружающей среды / Н. Д. Попов, В. А. Невский // Тр. МИСИ им. В. В. Куйбышева. Сб. № 15. – М., 1957. – С. 73–90.
8. Конопленко, А. И. К вопросу теории морозостойкости бетона / А. И. Конопленко // Сб. тр. Ростовского инженерно-строительного института. Вып. XII. – Ростов-на-Дону, 1958.
9. Мощанский, Н. А. Повышение стойкости строительных материалов и конструкций, работающих в условиях агрессивных сред / Н. А. Мощанский – М.: Госстандарт, 1962. – 235 с.

10. Collins, A. The destruction of concrete by frost / A. Collins // Institute of Civil Engineers, 1944. – P. 5412.
11. Цытович, Н. А. Основания механики мерзлых грунтов / Н. А. Цытович, М. И. Сумгин. – М.: Изд. АН СССР, 1937. – 432 с.
12. Лыков, А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / А. В. Лыков. – М.: – Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 464 с.
13. Батяновский, Э. И. Особо плотный бетон сухого формирования / Э. И. Батяновский. – Мн: НП ООО «Стринко», 2002. – С. 103–108.
14. Москвин, В. М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев. – М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.
15. Ахвердов, И. Н. Механизм разрушения пористых материалов при насыщении их солями / И. Н. Ахвердов, И. В. Станишевская // ДАН БССР. – 1967. – Т. 11. – № 4. – С. 320–323.
16. Алексеев, С. Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С. Н. Алексеев, Н. К. Розенталь – М.: Стройиздат, 1976. – 205 с.
17. Иванов, Ф. М. Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии / Ф. М. Иванов. – М.: Транспорт, 1968. – 175 с.
18. Путан, А. А. Оценка кристаллизационных давлений в пористых средах методом фотоупругости / А. А. Путан, А. А. Барташевич // Методы исследований стойкости строительных материалов и конструкций. – Мн.: Выш. Шк., 1969. – С. 60–69.
19. Гузеев, Е. А. Расчет железобетонных конструкций с учетом кинетики коррозии бетона третьего вида / Е. А. Гузеев, Н. В. Савицкий // Сб. научн. трудов НИИЖБа. под общ. ред. С. Н. Алексеева. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1988. – С. 16–20.
20. Шалимо, М. А. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии / М. А. Шалимо. – Мн.: Выш. Шк., 1986 г. – 200 с.
21. Москвин, В. М. Морозостойкость бетона в напряженном состоянии / В. М. Москвин, А. М. Подвальный // Бетон и железобетон. – 1960. – № 2. – С. 58–64.

22. Батяновский, Э. И. Оценка эксплуатационной долговечности тяжелого бетона по критерию «остаточной» морозостойкости / Э. И. Батяновский, А. И. Бондарович // Автомобильные дороги и мосты. – 2010. – № 2 (6). – С. 49–59.

Статья поступила: 22.11.2018

## REFERENCES

1. Powers T.C. *Working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete*. J. Am. Coner. Inst. 1945. N 4. V. 16.
2. Powers T.C, Helmuth R.A. *Theory of volume changes in hardened portland cement paste during freezing*. Proceedings Hig way Research Board. 1953. V. 32.
3. Gorchakov G. I., Kapkin M. M., Skramtayev B. G. *Povysheniye morozostoykosti betona v konstruksiyakh promyshlennykh i gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Increase frost resistance of concrete in industrial and hydraulic structures]. Moscow: «Stroyizdat», 1965. 195 p. (rus)
4. Shestoperov S. V. *Tsementnyy beton v dorozhnom stroitel'stve* [Cement concrete in road construction]. Moscow: «Dorizdat», 1950. 132 p. (rus)
5. Stol'nikov V. V. *Issledovaniya po gidrotekhnicheskomu betonu* [Studies on hydraulic concrete]. Moscow – Saint-Petersburg: «Gosenergoizdat», 1953. 330 p. (rus)
6. Sheikin A. E., Dobshits L. M. *Tsementnyye betony vysokoy morozostoykosti* [Cement concrete of high frost resistance]. Saint-Petersburg: «Stroyizddat», 1989, 128 p.
7. Popov N. D., Nevskiy V. A. *K voprosu ob ustalosti betona pri mnogokratnykh tsiklakh chereduyushchikhsya vozdeystviy okruzhayushchey sredy* [To the issue of fatigue of concrete with multiple cycles of alternating environmental influences]. Tr. MISI im. V. V. Kuybysheva. Sb. № 15. Moscow. 1957. Pp. 73–90. (rus)
8. Konoplenko A. I. *K voprosu teorii morozostoykosti betona* [On the theory of frost resistance of concrete]. Sb. tr. Rostovskogo inzhenerno-stroitel'nogo instituta. No.12. Rostov-on-Don, 1958. (rus)

9. Moshchanskiy N. A. *Povysheniye stoykosti stroitel'nykh materialov i konstruktsiy, rabotayushchikh v usloviyakh agresivnykh sred* [Increase the durability of building materials and structures working in aggressive environments]. Moscow: «Gosstandart», 1962. 235 p. (rus)
10. Collins A. The destruction of concrete by frost. *Institute of Civil Engineers*, 1944. P. 5412.
11. Tsytovich N. A., Sumgin M. I. *Osnovaniya mekhaniki merzlykh gruntov* [The foundations of the mechanics of frozen soils]. Moscow: Izd. AN USSR, 1937. 432 p. (rus)
12. Lykov A. V. *Teplo- i massoobmen v protsessakh sushki* [Heat and mass transfer in drying processes]. Moscow – Saint-Petersburg: «Gosenergoizdat», 1956. 464 p. (rus)
13. Batyanovskiy E. I. *Osobo plotnyy beton sukhogo formovaniya* [Particularly dense dry-cast concrete]. Minsk: «Strinko», 2002. Pp. 103–108. (rus)
14. Moskvina V. M., Ivanov F. M., Alekseyev S. N. *Korroziya betona i zhelezobetona, metody ikh zashchity* [Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods of their protection]. Moscow: Stroyizdat, 1980. 536 p. (rus)
15. Akhverdov I. N., Stanishevskaya I. V. *Mekhanizm razrusheniya poristyykh materialov pri насыshchenii ikh solyami* [Mechanism of destruction of porous materials when they are saturated with salts]. Minsk: DAN BSSR. 1967. V. 11. № 4. Pp. 320–323. (rus)
16. Alekseyev S. N., Rozental' N. K. *Korroziyonnaya stoykost' zhelezobetonnykh konstruktsiy v agressivnoy promyshlennoy srede* [Corrosion resistance of reinforced concrete structures in an aggressive industrial environment]. Moscow: «Stroyizdat», 1976. 205 p. (rus)
17. Ivanov F. M. *Zashchita zhelezobetonnykh transportnykh sooruzheniy ot korrozii* [Protection of reinforced concrete transport structures against corrosion]. Moscow: «Transport», 1968. 175 p. (rus)
18. Putan A. A., Bartashevich A. A. *Metody issledovaniy stoykosti stroitel'nykh materialov i konstruktsiy*. Minsk: «Vysh. Shk.», 1969. Pp. 60–69. (rus)

19. Guzeyev Ye. A., Savitskiy N. V. *Raschet zhelezobetonnykh konstruktsiy s uchetom kinetiki korrozii betona tret'yego vida* [Calculation of reinforced concrete structures taking into account the kinetics of corrosion of concrete of the third type]. Moscow: «NIIZHB Gosstroya SSSR», 1988. Pp. 16–20. (rus)
20. Shalimo M. A. *Zashchita betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy ot korrozii* [Protection of concrete and reinforced concrete structures against corrosion]. Minsk: «Vysh. Shk.», 1986. 200 p. (rus)
21. Moskvina V. M., Podval'nyy A. M. *Beton i zhelezobeton*. 1960. № 2. Pp. 58–64. (rus)
22. Batyanovskiy E. I., Bondarovich A. I. *Avtomobil'nyye dorogi i mosty*. 2010. № 2(6). Pp. 49–59. (rus)

*Received: 22.11.2018*