

УДК 666.972; 693.54

## К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ МОРОЗОСТОЙКОСТИ ЦЕМЕНТНОГО БЕТОНА ЗА СЧЕТ ИСКУССТВЕННО СОЗДАВАЕМОЙ ПОРИСТОСТИ

*А.М. Корсун, Э.И. Батяновский*

Белорусский национальный технический университет, Минск

e-mail: niil-bism@mail.ru

*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 эффективно с позиции обеспечения морозостойкости бетона относительно низких классов. Морозостойкость бетона большей непроницаемостью и прочностью целесообразно повышать наращивая эти показатели, в частности, за счет максимального снижения начального водосодержания и качественного уплотнения.*

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

## CONSTRUCTION OF CEMENT CONCRETE IN CONNECTION WITH ARTIFICIAL CREATION BY POROSITY

*A. Korsun, E. Batyanovskiy*

Belarusian National Technical University, Minsk

e-mail: niil-bism@mail.ru

*The article discusses the effect of alternating temperatures on the physicomaterial properties of concrete, infused using various chemical additives to increase frost resistance. The results of laboratory studies on increasing the frost resistance of cement concrete are presented, showing the possibility of ensuring high frost resistance without the use of air-entraining additives by increasing the density and impermeability of the structure. It has been experimentally shown that the introduction of air-entraining additives is effective from the standpoint of ensuring frost resistance of concrete with relatively low classes. It is advisable to increase the frost resistance of concrete of greater impermeability and strength by increasing these indicators, in particular, due to the maximum reduction in the initial water content and high-quality compaction.*

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

**Введение.** В развитии теории морозостойкости бетона представлено множество гипотез о причинах и механизме его постепенного разрушения при периодическом замерзании - оттаивании в водонасыщенном состоянии [1].

Первым и наиболее простым объяснением разрушения бетона в этих условиях явилось давление воды, замерзающей в его порах. Роль расширения воды при замерзании учитывается и в современных гипотезах, однако только это физическое явление не может полностью объяснить процесс разрушения бетона.

Следует отметить, что авторы разнообразных гипотез, объясняющих нарушения структуры и ухудшение физико-технических свойств бетона под воздействием циклического замораживания-оттаивания, зачастую отстаивали собственную точку зрения на «механизм» деструкции бетона, основываясь на общих проявлениях этого отрицательного воздействия. По существу их совокупность и есть механизм, приводящий к накоплению и последующему проявлению нарушений структуры бетона, потере его качества под воздействием мороза. То есть, эти факторы присущи морозному воздействию на бетон и являются объективными причинами его разрушения.

Так, обобщение разнообразных гипотез [1-10], 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.

С целью повышения морозостойкости на основании гипотезы Т. Пауэrsa «об интервале пор» [14,15] в бетоне создают искусственную замкнутую пористость (добавками СНВ, СДО, кремнийорганических жидкостей и современных «поризаторов», которые фактически получают на основе этих веществ).

В настоящее время обеспечение морозостойкости связано с применением структурообразующих (воздухововлекающих и газообразующих) добавок, действие которых основано на создании в структуре бетона системы мелких условно-замкнутых пор. Много внимания уделяется дозировкам, способам перемешивания и проч. Многочисленные данные позволяют однозначно сказать, что 1% вовлеченного воздуха приводит к снижению

прочности бетона на растяжение при изгибе на  $\sim 3\pm 1\%$ , а на сжатие – на  $\sim 6\pm 1\%$ , или 18% и 36% при 6% поризующего его структуру воздуха.

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.

В случае использования хлористых солей-антиобледенителей или испытательных солевых растворов действие означенных факторов на бетон дополняется следующим [16-19]. Во-первых, расклинивающим (в литературе часто называемым «кристаллизационным») давлением накопившейся соли, образовавшейся после пересыщения ее раствора в малых по объемам дефектах структуры цементного камня, в зоне контакта составляющих бетона и микротрещинах зерен заполнителя. При этом механизм образования и увеличения дефектов структуры может проявиться как за счет роста кристаллов соли, так и за счет «обжатия» их, например, прослойкой (оболочкой) цементного камня при отрицательных деформациях в период охлаждения бетона и возникающих при этом растягивающих усилий в цементном камне, вызывающих появление в нем трещин. Во-вторых, усилением процесса миграции воды и ростом влагоемкости бетона, в объеме пор которого накапливается соль. Соответственно возрастает, в сравнении с водой, эффект расклинивающего действия в устье трещин (дефектов) тонких пленок жидкости-раствора. В-третьих, возникает напряженное состояние на уровне микроструктуры цементного камня из-за локальных микроэффектов градиента температур (эндокринный эффект), сопровождающих процесс «очагового» растворения – кристаллизации соли.

Следует отметить, что в реальных условиях эксплуатации воздействие солей-антиобледенителей не прекращается и при положительной температуре окружающей среды. Попеременное увлажнение-высушивание, изменение температуры (даже в пределах суток) вызывают соответствующие деформации бетона, побуждают проявление процессов растворения – кристаллизации попавшей в его поры соли, 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. Успешно сопротивляться такому комплексному химико-физическому воздействию способен только бетон высокой плотности, непроницаемости и прочности. В этой связи, на наш взгляд, наиболее продуктивным способом повышения морозостойкости является не изменение структуры пористости (что обеспечивают воздухововлекающие добавки), а уплотнение цементного камня (раствора, бетона) и заполнение их пор прочными продуктами гидратации цемента. Этого можно добиться используя высокоэффективные современные пластификаторы или такой, содержащий аморфный  $\text{SiO}_2$ , материал как микрокремнезем.

**Результаты экспериментальной оценки морозостойкости бетона.** С целью оценки влияния на морозостойкость бетона наиболее распространенных на рынке Республики Беларусь «поризующих» добавок на начальном этапе исследований (замораживание ( $t = -50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и оттаивание в 5% растворе NaCl) выявили влияние ряда из них на свойства бетона, связанные с показателем его морозостойкости (таблица 1). Эти эксперименты выполнены на образцах мелкозернистого (цементно – песчаного) бетона постоянного номинального состава (цемента – 500 кг, песок (мытый,  $M_k \sim 2,6$ ) – 1600 кг, воды – 160...170 кг; при одинаковой жесткости бетонной смеси  $\sim 20...25$  с) на материалах, соответствующих требованиям действующей нормативно – технической документации. Химические добавки вводили с водой затворения в дозировке, рекомендуемой их производителями (таблица 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 (Софлексил 60-80; ЩСПК 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, т.е. 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 др. 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  $t \geq (-50...-55)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 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, т.е. 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, т.к. при введении указанных добавок его прочность существенно снижается (на 15...30 %, таблица 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 (таблица 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, т.е. 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 (таблицы 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	1117	162	2,15	0	0,301	2423
2. Реламикс ПК	430,0	697	1117	120	6,45	0	0	2590
3. Стахемент 2000М	430,0	697	1117	130	4,30	0	0	2515
4. Реламикс ПК + 5% МК	408,5	697	1117	120	6,45	21,5	0	2627
5. Реламикс ПК + 10% МК	387,0	697	1117	140	2,15	43,0	0	2644

Особенностью эксперимента было сопоставление примененного при этом состава (№1) бетона (цемента – 430 кг., песка – 697 кг., щебня (фр. 5...20 мм.) – 1117 кг., подвижность смеси марки «П1»), включающего пластификатор и воздухововлекающую добавку (см. таблицу 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	2423	47,5	47,8	47,7	31,3	18,9	-
2	РеламиксПК (1,5%)	0,27	2590	80,0	83,0	91,5	72,1	46,5	27,5
3	Стахемент2000М (1%)	0,30	2515	69,0	69,7	69,0	63,5	28,2	15,2
4	РеламиксПК (1,5%) +5%МК	0,29	2627	80,4	78,1	75,7	63,2	30,0	18,2
5	РеламиксПК(1,5%)+10%МК	0,36	2644	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 микропараном 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-ти 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, т.е. 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-ти 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:  $(В/Ц)_6 \sim 0,27$ , средняя плотность близка к 2600 кг/м<sup>3</sup> и водопоглощение по массе  $\leq 2\%$ , т.е. высокая непроницаемость бетона. Выявленный эффект роста прочности особо плотного

бетона при циклическом замораживании – оттаивании обоснован в источнике [13] применительно к высокопрочному бетону сухого формования. Эффект роста прочности связан с продолжающейся гидратацией цемента в бетоне особо плотной структуры под влиянием знакопеременного температурного воздействия. В частности, с тем, что при замерзании «поровой» жидкости цементного камня имеющиеся в ней продукты гидратации цемента «отжимаются» из ее объема к реакционным каемкам из новообразований, окружающим остаточные частицы цемента, дополняют их, уменьшая при этом сечения контракционных пор. Многократно (и объемно) повторяясь при циклическом замораживании – оттаивании бетона этот эффект способствует росту его плотности, т.к. реакция образования кристаллогидратов необратима (для этих температурных условий) и при оттаивании (отогреве) цементного камня в бетоне они остаются в структуре его реакционных каемок, постепенно «наращивая» их объем. Следствием этого является рост плотности и прочности бетона. Естественно, этот эффект характерен для плотного и непроницаемого бетона, т.к. одновременно «накладываются» деструктивные явления переменного замораживания – оттаивания, приведенные ранее. Превалирование «конструктивных» или «деструктивных» явлений проявляется в росте или снижении прочности бетона. Сохранение ее уровня как «const» свидетельствует о своеобразном «равенстве» этих факторов, проявляющихся во время испытаний бетона на морозостойкость, что подтверждает анализ данных таблицы 3.

Из результатов исследований (таблицы 2 и 3) следует, что введение в состав бетона добавки – поризатора едва ли не в два 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.

Исходя из полученных результатов, дальнейшим этапом исследований был эксперимент по оценке деформаций бетона образцов в процессе «замораживания – оттаивания» и по накоплению определенного количества циклов. Цель данного эксперимента – определить уровень деформаций «поризованного» воздухововлекающими добавками бетона и бетона без этих добавок, но характеризующегося структурой повышенной плотности ( $W_m \leq 2\%$ ).

Для данного эксперимента были изготовлены серии образцов №1 и №2 (таблица 2) идентичных составов и в толщу образцов были замоноличены тензометрические датчики (рисунок 1) на расстоянии 20 мм. от боковых граней образцов и в центральной части.

Первоначально эксперимент не удался, поскольку стандартные контакты (выводы) датчиков от значительных деформаций выходили из строя. В этой связи тензометрические датчики были модернизированы и усилены их выводы.

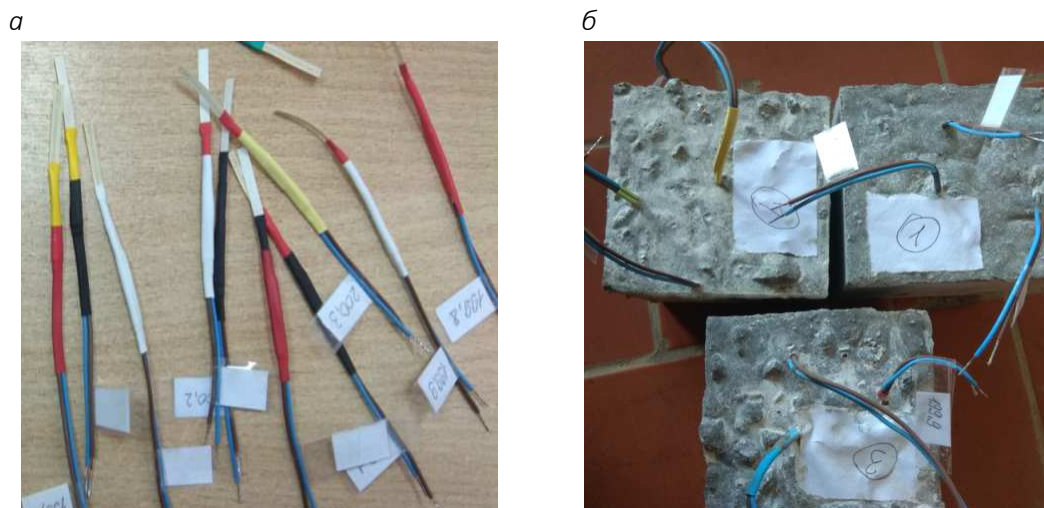


Рисунок 1.– Внешний вид модернизированных датчиков (а) и образцов бетона (б)

Эти испытания находятся в процессе реализации. Первично полученные данные свидетельствуют о разнице в уровне деформаций плотного и поризованного бетона в период как замерзания, так и оттаивания. К данному моменту серии образцов прошли уже 10 циклов замораживания-оттаивания в солевой среде. Отслеживается накопление деформаций в образцах. Информация о результатах эксперимента будет опубликована позднее, т.к. исследования продолжаются.

На данном этапе исследований считаем важным отметить, что оценка морозостойкости цементного бетона по снижению прочности на 5% от исходной для высокопрочного бетона не рациональна. Очевидно, что снижение прочности от 80...90 МПа и более на 5% (т.е. на 4,0...5,0 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.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горчаков, Г.И., Капкин, М.М., Скрамтаев, Б.Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. – М.: Стройиздат, 1965. –195с.
2. Powers, T.C. Working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete / T.C.Powers // J. Am. Coner. Inst., 1945, № 4. – v. 16.
3. Powers, T.C., Helmuth R.A. Theory of volume changes in hardened portland cement paste during freezing / T.C. Powers, R.A. Helmuth // Proceedings Higway Research Board, 1953: – v. 32.
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., Добшиц, Л.М. Цементные бетоны высокой морозостойкости / А.Е. Шейкин, Л.М. Добшиц – Л.: Стройиздат, 1989, – 128 с.
7. Попов, Н.Д., Невский, В.А. 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 // В 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 nov. – P.5412.
11. Цытович, Н.А., Сумгин, М.И. 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 формования / Э.И. Батяновский – М.: НП ООО «Стринко», 2002. – с. 103-108.
14. Powers, T.C. Working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete / T.C.Powers // J. Am. Coner. Inst., 1945, № 4. – v. 16.
15. Powers, T.C., Helmuth R.A. Theory of volume changes in hardened portland cement paste during freezing / T.C. Powers, R.A. Helmuth // Proceedings Higway Research Board, 1953: – v. 32.
16. Ахвердов И.Н., Станишевская, И.В. Влияние вида цемента на стойкость цементного камня при насыщении растворами NaCl и KCl / ДАН БССР. – Минск, 1967. – Т. 11, № 10. – С.893-896
17. Ахвердов, И.Н., Станишевская, И.В. Механизм разрушения пористых материалов при насыщении их солями / ДАН БССР. – Минск, 1967. – Т. 11, № 4. – С. 320-323.
18. Иванов Ф.М. Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии. – М.: Транспорт, 1968. – 175 с.
19. Путан, А.А., Барташевич, А.А. Оценка кристаллизационных давлений в пористых средах методом фотоупругости // В кн. Методы исследований стойкости строительных материалов и конструкций. – Мн.: Выш. Шк., 1969. – С. 60-69.

20. Москвин, В.М., Иванов, Ф.М. Алексеев, С.Н. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев – М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.
21. Алексеев, С.Н., Розенталь, Н.К. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С.Н. Алексеев, Н.К. Розенталь – М.: Стройиздат, 1976. – 205 с.
22. Иванов, Ф.М. Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии / Ф.М. Иванов – М.: Транспорт, 1968. – 175 с.
23. Гузеев, Е.А., Савицкий, Н.В. 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.
24. Шалимо, М.А. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии / М.А. Шалимо – Мн.: Выш. Шк., 1986 г. – 200 с.
25. Москвин, В.М., Подвальный, А.М. Морозостойкость бетона в напряженном состоянии / В.М. Москвин, А.М. Подвальный // Бетон и железобетон, 1960, № 2. – с. 58-64.
26. Батяновский, Э.И., Бондарович, А.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.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:  
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ  
II МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 28–29 ноября 2019 г.)

Новополоцк  
Полоцкий государственный университет  
2020

1 – дополнительный экран – сведения об издании

УДК 72:624/628+69(082)

Редакционная коллегия:

Л. М. Парфенова (председатель),  
А. С. Катульская (отв. секретарь), Е. Д. Лазовский,  
Н. В. Давыденко, Р. М. Платонова

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**  
[Электронный ресурс] : электронный сборник статей II международной научной конференции, Новополоцк, 28–29 нояб. 2019 г. / Полоцкий государственный университет ; под ред. Л. М. Парфеновой. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

ISBN 978-985-531-701-3.

Рассмотрены вопросы архитектуры и градостроительства в современных условиях, прогрессивные методы проведения инженерных изысканий и расчета строительных конструкций. Приведены результаты исследований ресурсо- и энергосберегающих строительных материалов и технологий, энергоресурсосберегающие и природоохранные инновационные решения в инженерных системах зданий и сооружений. Проанализированы организационные аспекты строительства и управления недвижимостью, проблемы высшего архитектурного и строительного образования.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов строительных специальностей учреждений образования.

*Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса.  
Регистрационное свидетельство № 3671815379 от 26.04.2018.*

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь  
тел. 8 (0214) 53 53 92, e-mail: a.bakatovich@psu.by; l.parfenova@psu.by

**№ госрегистрации 3671815379.**

**ISBN 978-985-531-701-3**

@Полоцкий государственный университет, 2020

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения

Для создания текстового электронного издания «Архитектурно-строительный комплекс: Проблемы, перспективы, инновации» использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:  
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ  
II МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 28–29 ноября 2019 г.)

Технический редактор *Т. А. Дарьянова.*

Компьютерная верстка *Т. А. Дарьяновой.*

Компьютерный дизайн обложки *Е. А. Балабуевой.*

---

Подписано к использованию 09.09.2020.

Объем издания: 21,05 Мб. Тираж 3 диска. Заказ 420.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

211440, ул. Блохина, 29,  
г. Новополоцк,  
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44  
<http://www.psu.by>