

МОРОЗО- И СОЛЕСТОЙКОСТЬ БЕТОНА, ПОДВЕРЖЕННОГО МЕХАНИЧЕСКИМ НАГРУЗКАМ

Докт. техн. наук, проф. БАТЯНОВСКИЙ Э. И., инж. БОНДАРОВИЧ А. И.

Белорусский национальный технический университет

В процессе эксплуатации на территории Беларуси бетон дорожных и аэродромных покрытий, тротуаров и других зон благоустройства городов и поселений за зимний период года подвергается переходам через нулевую отметку около 100 и более раз, т. е. воспринимает порядка 50 циклов попеременного замораживания–оттаивания. Применение в качестве противоморозных реагентов солей хлора формирует эксплуатационную среду, характеризующуюся комплексным агрессивным воздействием на бетон. Последнее «накладывается» на сложный механизм разрушительного действия знакопеременных температур и усиливает его деструктивный эффект.

Развитие теории морозостойкости бетона характеризуется множеством гипотез о причинах и механизме разрушения бетона при совместном действии на него воды и мороза [1–12], начиная с классического физического воздействия давления воды, замерзающей в его порах. Роль расширения воды при замерзании учитывается и в современных гипотезах, но само по себе это физическое явление не может полностью объяснить процесс разрушения бетона. В этой связи большое значение для развития теории морозостойкости бетона имеют выполненные в 30–60-е гг. XX в. работы, по существу сформировавшие современные представления о причинах и механизме морозной деструкции бетона и технологических мероприятиях для повышения его долговечности.

Обобщая разнообразные гипотезы [1–5, 8–12] и включая основы теории миграции влаги в пористых телах [6, 7], констатируем, что механизм нарушения структуры бетона, подвергаемого попеременному замораживанию и от-

таиванию в насыщенном водой состоянии, чрезвычайно сложен. Он представляет собой сочетание деструктивных факторов, включая: давление льда при кристаллизации свободной воды; гидродинамику ее перемещения (миграции) под влиянием градиента теплоты и влагосодержания (термовлагопроводности); гидростатическое давление защемленной в тупиковых порах и дефектах структуры жидкости; напряжения, возникающие от разницы температурных деформаций составляющих бетона и цементного камня (на макро- и микроуровне в контактных зонах); 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 гидрокристаллов (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 или испытательных солевых растворов действие означенных факторов на бетон дополняется [14–20] следующим. Во-первых, 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 за счет как роста кристаллов соли,

так и «обжатия» их, например прослойкой (оболочкой) цементного камня при «отрицательных» деформациях в период охлаждения бетона. Возникающие при этом растягивающие усилия в цементном камне вызывают 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. Кроме отмеченного, понижение эвтектической точки раствора соли способствует глубокому проникновению жидкой фазы в дефекты структуры все меньшего сечения, углубляет развитие процесса массопереноса соли и усиливает эффект деструкции бетона в целом.

Следует отметить, что в реальных условиях эксплуатации покрытий и элементов благоустройства отрицательное (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, т. е. сопровождается постоянным деструктивным воздействием на бетон.

Стандартные (базовый и ускоренный) методы определения морозостойкости (ГОСТ 10060.0...3–95) бетона в целом отражают взаимосвязь его долговечности с параметром морозостойкости. Но это только общая взаимосвязь означенных характеристик бетона, ее тенденция. В процессе эксплуатации бетона дорожных покрытий, элементов мощения и благоустройства они подвергаются интенсивному механическому воздействию: истирающим, сжимающим, изгибающим, ударным нагрузкам различной интенсивности и значений, которые

многократно повторяются во времени. Этот аспект деструктивного воздействия на бетон стандартные методы не учитывают как по причине непредсказуемости вероятных условий эксплуатации строительных изделий и конструкций, изготовленных из проверяемого бетона, так и из-за неопределенности критериев оценки их воздействия на последний. Несмотря на то, что еще в 30-е гг. XX в. Ю. А. Нилендер выявил непосредственное влияние напряженного состояния бетона от внешних (и «внутренних») воздействий на его морозостойкость и долговечность и в 50–60-е гг. XX в. под руководством В. М. Москвина [21] это направление исследований получило развитие, накопленной информации недостаточно для того, чтобы попытаться количественно оценить влияние механических нагрузок на морозо-, солестойкость бетона, особенно с учетом того факта, что они оказывают существенное влияние на проницаемость и прочность бетона [22]. Такая оценка необходима как для разработки методики контроля и прогнозирования эксплуатационной надежности и ожидаемой долговечности разнообразных бетонных покрытий транспортных коммуникаций и зон благоустройства, так и для определения уровня требований к физико-техническим характеристикам бетона при проектировании таких объектов различного назначения. С этой целью были выполнены экспериментальные исследования, результаты которых частично представлены в настоящей статье.

Материалы для бетона. Вяжущее – портландцемент марки ПЦ 500-Д0 ПРУП «Кричевцементошифер» (активность $R_{ц} \sim 44$ МПа, прочность на растяжение при изгибе $\sim 6,2$ МПа); коэффициент нормальной густоты $K_{нг} \sim 0,26$; плотность $\rho_{ц} \sim 3100$ кг/м³; удельная поверхность $S_{уд.ц} \sim 2980$ см²/г).

Мелкий заполнитель – природный песок заславльского месторождения, мытый (средняя плотность в рыхлонасыпном состоянии $\rho_{п}^0 \sim 1580$ кг/м³; в виброуплотненном $\rho_{п}^B \sim 1800$ кг/м³; плотность зерен $\rho_{п}^3 \sim 2650$ кг/м³; крупнозернистый $M_k \sim 2,7$; удельная поверхность $S_{уд.п} \sim 6410$ м²/т; удельное водопоглощение поверхности $B_{уд}^{ад} \sim 25,8$ л/кг; пустотность в виброуплотненном состоянии $\Pi_{п}^B \sim 32$ %).

Крупный заполнитель – щебень гранитный микашевичского месторождения (марка по дробимости «1400»; средняя плотность в рыхлонасыпном состоянии $\rho_{\text{щ}}^0 \sim 1310 \text{ кг/м}^3$; в виброуплотненном – $\rho_{\text{щ}}^{\text{в}} \sim 1480 \text{ кг/м}^3$; плотность зерен $\rho_{\text{щ}}^3 \sim 2700 \text{ кг/м}^3$; зерновой состав: фр. < 5 – 5 %; фр. 5–10 – 90 %; фр. 10–20 – 5 %; пустотность в виброуплотненном состоянии $\Pi_{\text{щ}}^{\text{в}} \sim 0,454$).

Для затворения бетона использовали воду водопроводную, удовлетворяющую требованиям СТБ 1114–98.

Общая методика исследований. В настоящих исследованиях использовали цементно-песчаный бетон (цемента – 500 кг; песка – 1600 кг) и бетон со щебнем гранитным (цемента – 450 кг; щебня – 600 кг; песка – 1150 кг) при водоцементном отношении В/Ц $\sim 0,33$ – $0,36$ и $0,36$ – $0,40$ соответственно при показателе жесткости Ж ~ 15 – 25 с. Образцы бетона уплотняли на виброплощадке со стандартными параметрами ($A = 0,5$ мм; $f \approx 50$ Гц) в течение времени и под пригрузом, обеспечивающим получение расчетного качества (степени) уплотнения свежееотформованного бетона, которое оценивали по средней плотности, принятой не ниже 2250 кг/м^3 для цементно-песчаного бетона и для бетона со щебнем $\geq 2350 \text{ кг/м}^3$ [23].

Данные по определенным в исследованиях характеристикам бетона получены как средние значения с соблюдением правил обработки результатов испытаний, установленных в соответствующих стандартах; прочность на сжатие приведена к образцам $150 \times 150 \times 150$ мм. Во всех случаях образцы испытывали по достижении проектного возраста (28 сут.) после изготовления.

Учитывая существенное влияние на эксплуатационные свойства бетона условий его твердения и практикуемые варианты твердения изделий, серии образцов хранили: в условиях гидроизоляции (под полиэтиленовой пленкой); на воздухе (со средней температурой ≈ 18 – 23 °С и относительной влажностью 60–70 %) и пропаривали (по режиму: предварительная выдержка – 2 ч; подъем температуры в ямной камере до 50 °С – 2 ч; изотермическая выдержка –

6,5 ч; остывание – 6–10 ч) с последующим «дозреванием» в помещении лаборатории.

Цель экспериментов заключалась в выявлении закономерностей изменения свойств бетона под комплексным воздействием циклического замораживания–оттаивания (насыщения в растворе NaCl – высушивания) и механических нагрузок (статических и динамических). С учетом того, что продолжительное воздействие этих агрессивных по отношению к бетону факторов должно в какой-то момент привести к нарушениям его структуры, отслеживали изменение скорости прохождения ультразвукового импульса (далее – скорость ультразвука) во взаимосвязи с изменяющимися свойствами бетона: прочностью, изменениями массы, проницаемостью.

Исследования осуществили на трех партиях образцов. Для первой партии циклическое замораживание–оттаивание вели по третьему методу ГОСТ 10060–95 как для дорожного бетона с охлаждением образцов ($70 \times 70 \times 70$ мм) до $-(50$ – $55)$ °С и оттаиванием при 18 ± 2 °С в жидкости, но вместо 5%-го водного раствора NaCl в емкостях использовали водопроводную воду. На этом этапе исследований исключили влияние солевого воздействия на бетон.

Вторую партию образцов циклически насыщали в 5%-м растворе NaCl (температура ~ 15 – 18 °С) в течение 16 ч с последующим высушиванием в сушильном шкафу при температуре ~ 60 °С в течение 7–8 ч. Условия эксперимента были ужесточены тем, что разогретые при высушивании образцы бетона помещали в раствор соли без предварительного охлаждения на воздухе.

Третью партию образцов бетона подвергали стандартным испытаниям замораживанием–оттаиванием по третьему методу ГОСТ 10060–95 при температуре $-(50$ – $55)$ °С в 5%-м растворе NaCl.

Статическую механическую нагрузку на образцы бетона имитировали загрузением их после оттаивания (через каждые пять циклов замораживания–оттаивания) под прессом с усилием примерно до 20; 30; 50 и 70 % от прочности бетона в проектном возрасте (28 сут.), а при испытаниях на солестойкость – с такой же периодичностью и усилиями, но после насыщения в растворе соли.

Динамическую (ударную, сосредоточенную) механическую нагрузку на оттаявшие (насыщенные в растворе соли) образцы бетона имитировали десятью ударами копра – плотномера динамического (СТБ 1242–2000; масса груза ~2,5 кг; высота падения – 300 мм; точка касания – острие конуса с углом при вершине 60 град.) по одной из их поверхностей через каждые пять циклов замораживания–оттаивания (насыщения–высушивания).

Периодичность испытаний бетона по различным показателям – изменению массы, прочности, скорости ультразвука, истираемости – приведена в тексте, как и особенности методик отдельных экспериментов.

Для получения сравнительных характеристик в каждой партии образцов бетона имелись контрольные, которые подвергали циклическому замораживанию–оттаиванию (насыщению–высушиванию) без дополнительного воздействия механических нагрузок.

Основные результаты испытаний в «среде-воде». Изменение массы бетона. В табл. 1 приведены данные об изменениях массы образцов мелкозернистого бетона, твердевшего в условиях гидроизоляции (под пленкой). Очевидно, что положительный прирост массы (+) отражает увеличение водосодержания бетона в

процессе циклического замораживания и оттаивания на начальном этапе испытаний, а (–) ее последующее снижение, т. е. начало и развитие деструктивных процессов с поверхности образцов. Увеличение потерь массы сопровождалось появлением признаков морозной деструкции в виде округления ребер (медленно развивающегося, так как бетон достаточно плотен). Поглощение порами бетона (как цементно-песчаного, так и со щебнем) «дополнительного» (к водонасыщению в течение 96 ч) количества воды связано с двумя причинами: проникновением жидкости в дефекты структуры, не заполненные ею в процессе водонасыщения и образующиеся в процессе испытаний, а также со своеобразным «ускоряющим» воздействием переменного замораживания с оттаиванием бетона в водных условиях на развитие реакций гидратации цемента и связывания им воды. Этот эффект подробнее рассмотрен далее.

Из данных, частично представленных в табл. 1, следует, что статическая механическая нагрузка в пределах до 30–40 % от прочности бетона проектного возраста (для цементно-песчаного – до 15 МПа; с крупным заполнителем – до 20 МПа) не вызывает существенных изменений в кинетике снижения массы бетона в процессе испытаний.

Таблица 1

Изменения массы основных образцов мелкозернистого бетона в процессе испытаний

Значение нагрузки, МПа	$m_{\text{ест.}}$, г	$m_{\text{нас.}}$, г	$V_{\text{погл.}}$, г	Изменения массы образцов, г, после количества циклов замораживания–оттаивания, циклы											
				5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
0	790,7	801,2	9,5	1,7	0,8	-0,1	-0,5*	-0,6	-1,6*	-1,8	-1,9*	-2,4	-2,9*	-3,0	-3,6*
10	790,0	799,7	9,7	1,6	0,9	-0,3	-0,6*	-0,8	-1,2*	-1,7	-2,1*	-2,3	-3,0*	-3,3	-3,8*
20	784,4	793,2	8,8	1,2	-0,8	-1,8	-2,1*	–	–	–	–	–	–	–	–
	775,0	784,5	9,5	1,6	-0,7	-1,6	-2,5	-1,6	-1,7*	–	–	–	–	–	–
	793,0	802,7	9,7	0,8	-1,0	-1,0	-1,8	-1,9	-2,4	-2,9	-3,5*	–	–	–	–
	800,5	809,5	9,0	1,4	-0,9	-1,5	-2,0	-2,2	-3,1	-3,8	-4,6	-5,0	-5,6*	–	–
	793,3	802,8	9,5	1,7	-0,7	-1,3	-1,8	-2,1	-2,9	-3,7	-4,5	-4,8	-5,1	-6,8	-8,0*
25	791,0	801,2	10,2	1,7	-0,8	-2,6	-3,8*	–	–	–	–	–	–	–	–
	785,0	793,9	8,9	1,5	-1,0	-2,9	-3,5	-3,3	-3,9*	–	–	–	–	–	–
	794,4	803,4	9,4	1,4	-1,6	-2,5	-3,0	-3,9	-4,6	-5,5	-6,8*	–	–	–	–
	788,2	797,8	9,6	1,7	-1,1	-2,8	-3,7	-3,9	-4,1	-5,5	-7,8	Эксперимент прекращен $\Delta m > 3\%$			
30	794,4	803,6	9,2	1,6	-1,9	-3,0	-3,8	-5,9	-3,8	-4,0	-7,1	Эксперимент прекращен $\Delta m > 3\%$			
	786,6	796,4	9,4	1,5	-2,8	-3,9	-4,5*	–	–	–	–	–	–	–	–
	794,3	803,2	8,9	1,4	-2,5	-3,6	-5,6	-5,4	-6,0*	–	–	–	–	–	–
	790,0	799,9	9,9	1,6	-3,1	-4,5	-5,1	-6,2	-6,5	-7,8	-7,9*	Эксперимент прекращен $\Delta m > 3\%$			
	793,0	802,6	9,6	1,3	-2,4	-4,5	-4,3	-4,8	-6,2	-6,1	-8,8	Эксперимент прекращен $\Delta m > 3\%$			
779,6	788,4	8,8	1,5	-2,6	-3,8	-5,1	-5,9	-6,0	-5,3	-8,5	Эксперимент прекращен $\Delta m > 3\%$				

Значение нагрузки, МПа	$m_{\text{ест}}$ г	$m_{\text{нас}}$ г	$B_{\text{погл}}$ г	Изменения массы образцов, г, после количества циклов замораживания–оттаивания, циклы											
				5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Динамическая (ударная) нагрузка	812,9	823,0	10,1	0,5	-1,9	-1,7	-2,5*	–	–	–	–	–	–	–	–
	788,3	796,9	8,6	1,2	-1,1	-1,9	-2,8	-2,9	-3,1*	–	–	–	–	–	–
	803,0	811,8	8,8	1,2	-2,0	-0,9	-1,5	-2,4	-3,6	-3,8	-3,5*	–	–	–	–
	792,1	801,6	9,5	0,7	-0,9	-1,8	-2,9	-3,8	-3,0	-4,1	-4,6	-5,9	-6,5*	Эксперимент прекращен	
	780,5	790,1	9,6	0,8	-1,5	-1,4	-1,9	-2,5	-2,8	-4,4	-3,1	-5,0	-5,1		

*После означенного количества циклов серия образцов испытана на сжатие.

С увеличением нагрузки примерно до 50 % от прочности проектного возраста, т. е. до 20 МПа (мелкозернистый бетон) и до 25 МПа (бетон со щебнем), потери массы в процессе испытаний начинают нарастать.

С повышением нагрузки сверх 25 МПа для мелкозернистого бетона и 30 МПа для бетона со щебнем, т. е. на уровне ~60 % от прочности проектного возраста и более, деструктивные процессы интенсифицируются, что отражается в росте потерь массы образцами.

Если сравнивать отрицательный эффект от динамических нагрузок (результаты частично представлены в табл. 1) с таковым от воздействия на бетон сжимающей статической нагрузки, то (для условий выполненных экспериментов) динамическая нагрузка по воздействию на бетон примерно соответствует уровню статической нагрузки в 60%-й и более от прочности бетона в проектном возрасте.

Изменение прочности бетона. В соответствии с принятой общей методикой исследований оттаявшие образцы основных серий через каждые пять циклов однократно подвергали сжатию под прессом, передавая усилие на бетон, соответствовавшие 10; 20; 25 и 30 МПа для образцов мелкозернистого бетона и 15; 25; 30 и 35 МПа – для бетона со щебнем.

Из данных табл. 2 следует отметить непосредственную взаимосвязь изменений прочности бетона как контрольных, так и основных образцов с условиями их твердения и состояния структуры (пористости) материала: наименьшей прочностью характеризуется бетон, твердевший в воздушно-сухих условиях. Но даже в этом случае после первых 10–30 циклов замораживания–оттаивания прочность образцов бетона (до уровня статической нагрузки

в 10–20 МПа для мелкозернистого бетона и в 15–25 МПа для бетона со щебнем) несколько возрастает. Этот эффект значительнее для образцов, твердевших «под пленкой» и пропаренных после изготовления.

Явление роста прочности бетона под знакопеременным температурным воздействием есть отражение специфического влияния последнего на процесс гидратации цемента. При циклическом замораживании бетона (достигшего проектной прочности и характеризующегося степенью гидратации цемента в 60–70 % при водопоглощении по массе ~3–5 %, как в нашем случае) происходит следующее. Жидкость, находящаяся в объеме пор цементного камня, содержит гидратированные ионы клинкерных минералов как результат медленно текущей (к более чем 28 сут. твердения) реакции гидратации цемента. При охлаждении до глубокой отрицательной температуры в первую очередь замерзает растворитель, т. е. вода. Растворенные в ней ионы «отжимаются» к поверхности твердой фазы, создавая в этих объемах их повышенную концентрацию вплоть до пересыщения раствора и тем самым обеспечивая условия для возникновения и формирования твердофазных кристаллогидратных новообразований. Поскольку последняя реакция необратима, при оттаивании сформировавшиеся кристаллогидраты дополняют ранее сложившуюся структуру «реакционных каемок» вокруг непрогидратировавших цементных «ядер» и постепенно уплотняют ее. А многократное повторение этой ситуации способствует росту прочности цементного камня и бетона в целом.

Одновременно с этим явлением знакопеременные температурные воздействия вызывают деструктивные процессы, рассмотренные во

введении. В результате на начальном этапе испытаний превалирует эффект побуждения реакций гидратации вяжущего, выражающийся в росте прочности бетона. С течением времени начинают преобладать деструктивные явления, которые в наших экспериментах усилены за счет воздействия периодически прикладываемой

к образцам нагрузки. Возникающие в объеме цементного камня напряжения (особенно в зонах контакта его с заполнителями) приводят к микротрещинообразованию. Известно, что этот отрицательный эффект проявляется уже на уровне нагрузки $\geq 30\%$ от «призмной» прочности бетона [24].

Таблица 2

Изменения прочности контрольных и основных образцов бетона

Условия твердения бетона		Значение нагрузки, МПа	Значения прочности бетона на сжатие, МПа, после количества циклов замораживания–оттаивания, циклы						
			0	10	20	30	40	50	60
Мелкозернистый	Естественные (под пленкой)	0	43	45	46	46	44	41	38
		10	43	45	44	43	42	39	35
		20	43	44	43	41	39	36	31
		25	43	44	42	39	34	–	–
		30	43	43	41	35	30	–	–
		Ударная нагрузка	43	44	43	41	38	35	–
	Воздушно-сухие	0	36	38	38	38	35	30	24
		10	36	37	38	36	31	29	–
		20	36	37	36	32	28	–	–
		25	36	35	34	29	23	–	–
		30	36	34	32	25	–	–	–
		Ударная нагрузка	36	37	34	31	27	–	–
	Пропаривание с дозреванием	0	40	41	43	42	40	37	33
		10	40	41	42	41	38	35	30
		20	40	40	41	38	34	–	–
		25	40	40	39	35	30	–	–
		30	40	39	37	32	26	–	–
		Ударная нагрузка	40	41	39	35	32	–	–
Бетон со щебнем	Естественные (под пленкой)	0	50	52	54	54	52	50	46
		15	50	52	54	52	50	48	44
		25	50	51	50	49	46	41	–
		30	50	51	50	47	44	38	–
		35	50	51	49	45	38	–	–
		Ударная нагрузка	50	52	50	48	45	41	38
	Воздушно-сухие	0	42	43	44	44	42	40	37
		15	42	43	44	42	39	36	33
		25	42	43	43	42	37	–	–
		30	42	42	41	39	34	–	–
		35	42	42	40	35	–	–	–
		Ударная нагрузка	42	43	42	40	37	34	–
	Пропаривание с дозреванием	0	48	49	51	50	48	46	42
		15	48	49	51	49	47	44	41
		25	48	49	50	47	43	38	–
		30	48	48	49	46	41	34	–
		35	48	48	48	44	36	–	–
		Ударная нагрузка	48	49	49	45	42	38	–

В наших экспериментах микротрещинообразование усиливается как за счет повторения в приложении нагрузки через каждые пять циклов, так и под воздействием знакопеременной температуры и вызываемых ею деструктивных явлений. В результате увеличение нагрузки сверх 30–40 % от прочности бетона проектного возраста (т. е. превышение нижней границы его трещинообразования) сопровождается снижением последней под воздействием циклического замораживания–оттаивания. С увеличением статической нагрузки до 60 % и более (т. е. до уровня верхней границы трещинообразования) процесс морозной деструкции бетона и снижение его прочности прогрессируют. Установлено, что отрицательное воздействие динамической ударной нагрузки примерно соответствует (по фактическим данным снижения прочности бетона) уровню статической нагрузки в 60 % и более. На наш взгляд, это связано с тем, что и в одном, и во втором вариантах воздействия на бетон механическими нагрузками появляются микротрещины в структуре бетона, развитие которых усугубляется действием знакопеременной температуры при замораживании–оттаивании бетона. Под действием сосредото-

ченной ударной нагрузки в бетоне возникают локальные очаги достаточно высоких напряжений, которые в хрупком материале приводят к трещинообразованию в зоне удара. Многократное повторение такого воздействия приводит к зарождению микротрещин в цементном камне и последующему их развитию. Этот процесс ускоряется под влиянием факторов, сопровождающих действие знакопеременной температуры, особенно при глубоком замораживании. Следует отметить, что возникающие нарушения структуры будут ухудшать и другие эксплуатационные характеристики бетона.

Изменение скорости ультразвука. Параллельно с испытаниями образцов на прочность при циклическом замораживании–оттаивании снимали показания скорости ультразвука с целью накопления данных об их взаимосвязи со структурными изменениями в бетоне (рис. 1).

При этом выявлено, что изменения структуры в виде микротрещин и их развитие в процессе испытаний образцов бетона отражаются в снижении скорости ультразвука раньше (и резче), чем это сказывается на прочности бетона.

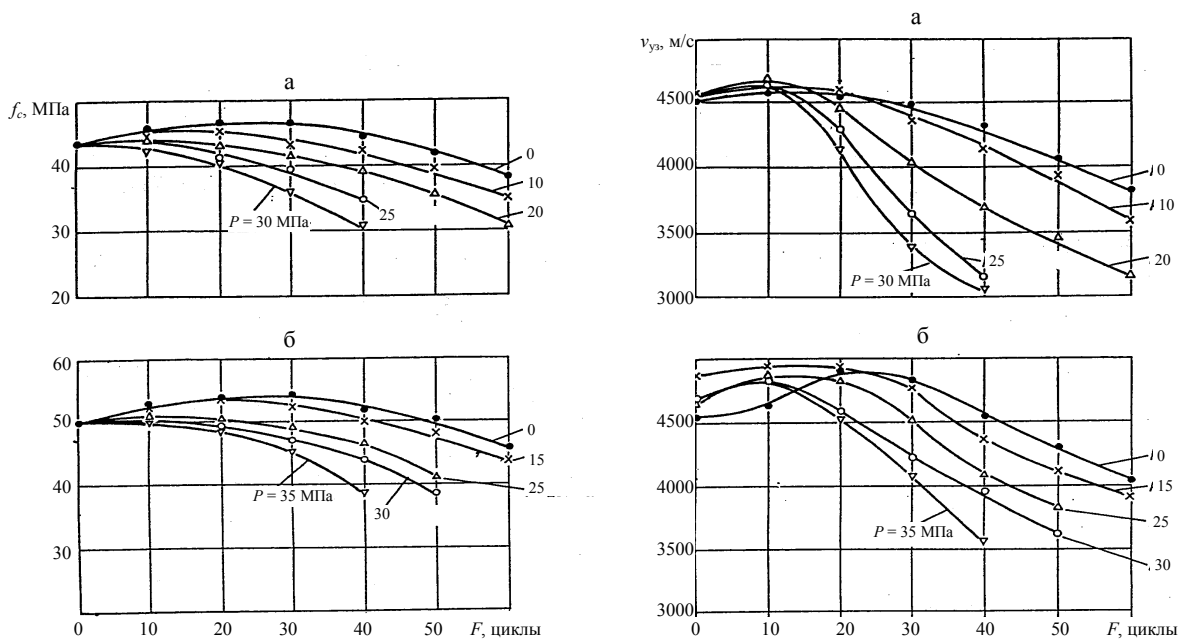


Рис. 1. Тенденция изменения прочности и скорости ультразвука контрольных ($P = 0$) и основных образцов под воздействием циклического замораживания–оттаивания в «среде-воде» при $t = -(50-55)^\circ\text{C}$ и статической механической нагрузки: а – мелкозернистого бетона; б – бетона со щебнем

Например, для контрольных образцов ($P = 0$) мелкозернистого бетона скорость ультразвука стабилизируется к 20 циклам, а затем начинает медленно снижаться. Прочность же бетона в этом примере возрастает до 30 циклов, а затем начинает снижаться. То есть показания скорости распространения ультразвукового импульса на более ранней стадии реагируют на начало превалирования деструктивных явлений в бетоне над его упрочнением и предвещают появление необратимых нарушений в структуре цементного камня и бетона. В этой связи использование ультразвука может быть положено в основу методики неразрушающего контроля и прогнозирования изменений свойств и долговечности бетона.

Истираемость бетона. Истираемость образцов бетона ($70 \times 70 \times 70$ мм) определяли во всех случаях в водонасыщенном состоянии по методике ГОСТ 13087 «Методы определения истираемости» на круге истирания ЛКИ-3 (по два образца одновременно). Контрольные образцы вместе с основными подвергали циклическому замораживанию–оттаиванию и испытывали на истираемость через 10 циклов после оттаивания в воде. Установлено, что статическая (сжатие–отпуск) нагрузка до значений ≤ 60 % от проектной прочности бетона не оказывает влияния на его истираемость, несколько повышая ее при нагрузке в 70–80 % от проектной прочности. Ударная динамическая нагрузка на бетон (10 ударов копра по «границе истирания» через каждые пять циклов) однозначно сопровождается ростом его истираемости на каждом из отрезков или периодов испытаний, а значит, и в процессе эксплуатации дорожных покрытий и элементов благоустройства. Под ее воздействием основные образцы снижают «износостойчивость» примерно к 25 циклам (контрольные – через 35–40 циклов), затем процесс деструкции усиливается и ускоряется. Образцы со щебнем характеризуются большей износостойчивостью, и темп ее снижения под действием циклического замораживания–оттаивания и динамической нагрузки значительно ниже, чем у мелкозернистого бетона.

Влияние условий твердения бетона на его истираемость однозначно – воздушно-сухие условия твердения приводят к ускоренному снижению этого показателя, в сравнении с бо-

лее благоприятными – твердением в условиях гидроизоляции и пропариванием с дозреванием на воздухе.

Испытание солестойкости бетона. Результаты экспериментов подтверждают общность тенденций «поведения» образцов бетона (как цементно-песчаного, так и со щебнем) при циклических испытаниях на морозо- и солестойкость (насыщение в растворе соли – высушивание) в изменениях массы образцов, прочности бетона, скорости ультразвука и истираемости.

Разница между ними проявилась в том, что при испытаниях на морозостойкость (в водной среде) снижение массы образцов «наметилось» как результат начала деструктивных явлений и постепенно закономерно прогрессировало. В случае же с насыщением в солевом растворе и высушиванием деструктивный процесс развивается сложнее и сопровождается неоднородными изменениями массы образцов бетона как в насыщенном состоянии, так и определенными для высушенных образцов. Так, в первые 5–10 циклов насыщения–высушивания масса насыщенных в растворе соли образцов существенно возрастает (до $\sim 1,5$ –3 % для цементно-песчаного и до $\sim 1,5$ % для бетона со щебнем), а затем начинает снижаться. Через 15–20 циклов наступают необратимые изменения в структуре бетона и процесс его разрушения прогрессирует, что отражается снижением массы и прочности (табл. 3) образцов.

Рост прочности бетона (табл. 3) на начальной стадии эксперимента в основном обеспечивается за счет коагуляции пор кристаллами соли, благодаря чему уменьшается количество зон с нарушениями сплошности структуры материала, которые под нагрузкой создают в нем напряженное состояние, являются концентраторами напряжений и вызывают зарождение трещин под действием как внешних нагрузок, так и резких перепадов температуры. В дальнейшем проявляется агрессивное воздействие солевой коррозии. Оно усиливается за счет периодически прикладываемой к образцам нагрузки, при этом процесс деструкции бетона прогрессирует с ее увеличением сверх 50–60 % от проектной как при насыщении образцов раствором соли, так и при насыщении их водой.

Таблица 3

Изменения прочности контрольных и основных образцов мелкозернистого бетона

Условия твердения бетона	Значение нагрузки, МПа	Значения прочности бетона на сжатие, МПа, после количества циклов насыщения–высушивания, циклы					
		0	10	20	25	30	35
Естественные (под пленкой)	0	40	44	43	40	38	35
	10	40	45	42,5	41	37	34
	20	40	44	40	38	35,5	31
	25	40	42,5	38,5	35	32*	–
	30	40	40,5	36,5	30,5	–	–
	Ударная нагрузка	40	40,5	36,5	32,5	28	–
Воздушно-сухие	0	36	40,5	39	36	34,5	30,5
	10	36	40	39,5	35	33	30
	20	36	38,5	37	33,5	30	–
	25	36	38	36,5	31	27	–
	30	36	37,5	32	28,5	–	–
	Ударная нагрузка	36	35	32	25	–	–
Пропаривание с дозреванием	0	39	44	43	39	36,5	33,5
	10	39	43	41,5	39,5	35	31,5
	20	39	42,5	41	37,5	34	30
	25	39	40	37	31	–	–
	30	39	39	35,5	30	–	–
	Ударная нагрузка	39	39	36	29	–	–
То же при насыщении образцов водой	0	39	40,5	39	38	36,5	35,5
	10	39	40	38,5	37,5	37	36
	20	39	39,5	38	37	36,5	34,5
	25	39	38,5	36,5	35	33,5	31,5
	30	39	38	35,5	33	31,5	30

* Эксперимент прекращен (снижение прочности $\geq 20\%$).

В последнем случае его темп ниже, так как отсутствует агрессивное воздействие соли. Полученные данные свидетельствуют о том, что при нагрузке $\geq 70\%$ от проектной уровень трещинообразования в бетоне таков, что последующее циклическое воздействие как при насыщении в солевом растворе, так и в воде приводит к резкому снижению прочности бетона. В этом случае практически отсутствует (при нагрузке 30 МПа для мелкозернистого и 35 МПа для бетона со щебнем) прирост прочности бетона на начальном этапе испытаний. Выявлено, что отрицательное воздействие динамической ударной нагрузки примерно соответствует (по фактическим данным снижения прочности бетона) уровню статической нагрузки в 60 % и более. Изменения скорости ультразвука во взаимосвязи с изменениями массы и прочности образцов бетона коррелируют с ранее получен-

ными данными, что подтверждает выявленную при испытаниях бетона на морозостойкость закономерность: скорость ультразвука снижается раньше, чем это сказывается на прочности бетона. По влиянию на истираемость бетона солевые испытания оказались наиболее жесткими, характеризующимися ее резким ростом уже после 15–20 циклов, что связано, на наш взгляд, с нарушениями микроструктуры цементного камня под влиянием солевой коррозии с соответствующим снижением его твердости и прочности.

Морозостойкость бетона в солевом растворе. Изменения массы образцов. Сопоставление данных об изменении массы образцов бетона (мелкозернистого и со щебнем) на морозостойкость (в воде или растворе соли) и солей свидетельствует, что наиболее агрессивным воздействием на бетон обладали

последние. Очевидно, это связано с дополнительным влиянием на структуру бетона «термического удара», возникающего при резком (жидкостном) охлаждении образцов, помещаемых после сушки ($t \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$) в растворе соли ($t \sim 10\text{--}15 \text{ }^\circ\text{C}$). При этом в наружных слоях бетона возникали касательные растягивающие напряжения (от «термического» сжатия их), приводящие к образованию в них микротрещин. Такое воздействие, приложенное многократно в циклических испытаниях, дополняет и интенсифицирует разрушающее действие соли, что и подтверждено в экспериментах.

При испытаниях на морозостойкость термическое воздействие на образцы естественно имеет место. Однако в этом случае при оттаивании их в слое замерзшей жидкости наружные слои бетона постепенно нагреваются в процессе ее таяния и механизм температурных деформаций иной, так как эти слои расширяются. Растягивающие напряжения наружные слои бетона испытывают при замерзании образцов, но и в этом случае резкого «термического удара» не наблюдается. В целом данные исследований свидетельствуют о том, что испытания на морозостойкость (даже в растворе соли) оказывают менее разрушающее влияние на бетон, чем испытания на солестойкость, выполненные

по использованной методике. Одновременно эти данные подтверждают опасность агрессивного воздействия на бетон солей-хлоридов, примененных в качестве антиобледенителей, и в летний период эксплуатации покрытий.

Сравнение данных об изменении массы образцов бетона при испытаниях на морозостойкость в растворе соли и воде (рис. 2) позволяет сделать вывод о том, что солевая среда резко интенсифицирует процесс деструкции бетона в сравнении с замораживанием–оттаиванием в воде. Интенсивность снижения массы ($\sim 3\text{--}4 \text{ г}$ за пять циклов) контрольных образцов бетона к 30–35 циклам испытаний в солевой среде соответствует таковой к 60 и более циклам испытаний в «воде-среде», т. е. росту примерно в два раза. Если бетон подвержен одновременно воздействию статической механической нагрузки (но не превышающей уровень $\sim 50\%$ -й проектной прочности бетона) и «солевому» размораживанию, то процесс деструкции начинает ускоряться, а с ростом периодически прикладываемой нагрузки до 60 % и более от проектной он повышается в 3–4 раза в сравнении с испытаниями в «воде-среде». Отмеченные закономерности характерны и для изменений других характеристик бетона, включая его прочность.

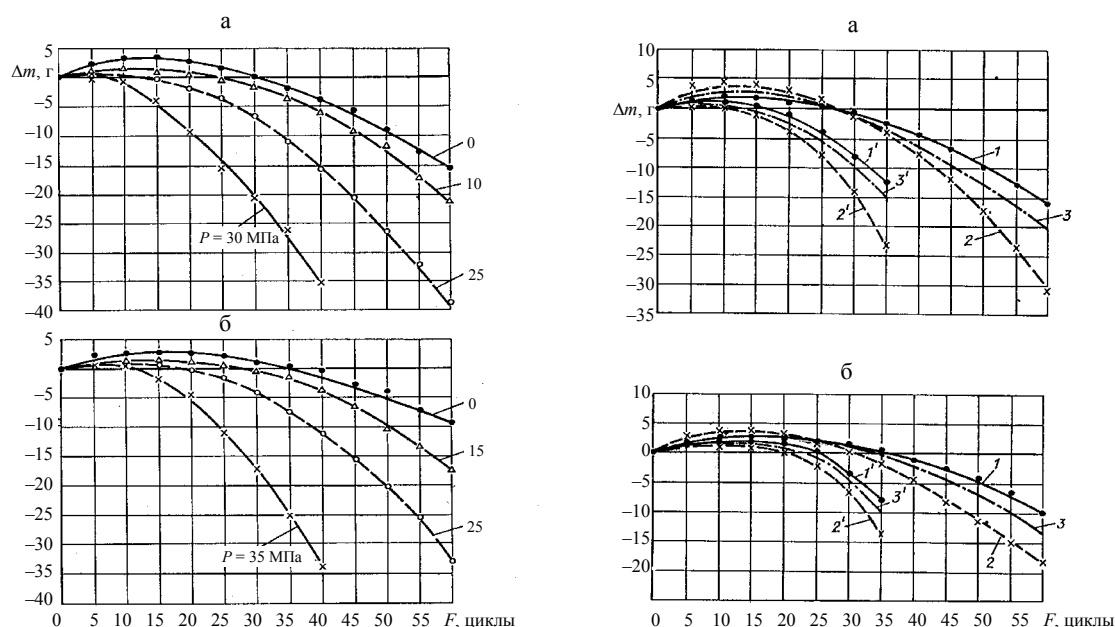


Рис. 2. Тенденция изменения массы основных образцов под воздействием циклического замораживания–оттаивания в «среде-воде» при $t = -(50\text{--}55) \text{ }^\circ\text{C}$ в зависимости от статической механической нагрузки и условий твердения (графики 1, 2 и 3 для образцов, твердевших соответственно «под пленкой», в воздушно-сухих условиях, пропаренных с дозреванием и испытанных в «среде-воде»; со штрихом – испытанных в растворе соли): а – мелкозернистого бетона; б – бетона со щебнем

Прочность бетона. Анализ данных испытаний бетона на морозостойкость в «среде-воде» и растворе соли (рис. 3) свидетельствует о том, что для контрольных образцов (отсутствует механическая нагрузка) сохраняется общая закономерность некоторого роста прочности бетона на начальном этапе испытаний до 30–35 циклов в воде и до 10–20 циклов в растворе соли. Затем прочность бетона закономерно снижается при более высоком темпе для испытаний в солевом растворе. Если оценить эти изменения по количеству циклов, то получается, что влияние солевого раствора проявляется, примерно, в 2–3-кратном ускорении процесса деструкции (по началу снижения прочности) бетона.

Сопоставление данных воздействия на бетон эффектов «размораживания» и солевой коррозии в сочетании с механическими нагрузками показывает следующее.

Если статически приложенная нагрузка не превышает 40 % от проектной прочности бетона (уровень нижней границы трещинообразования), то при циклических испытаниях на морозостойкость (как в «среде-воде», так и в растворе соли) изменения в прочности бетона практически одинаковы для контрольных и нагружаемых образцов.

С ростом нагрузки до 50–60 % от проектной (в экспериментах до 20–25 МПа для мелкозернистого и до 25–30 МПа для бетона со щебнем) процесс его деструкции при циклических

испытаниях на морозостойкость активизируется.

В случае, когда механические нагрузки достигают уровня 65–75 % от проектной прочности бетона, т. е. соответствующего или превышающего верхнюю границу его трещинообразования (в экспериментах равнялась ~30 МПа для мелкозернистого и ~35 МПа для бетона со щебнем), процесс деструкции и снижения прочности бетона прогрессирует уже после 10–20 циклов замораживания–оттаивания (при ускоренном развитии процесса в растворе соли). Это связано с тем, что означенный уровень нагрузки приводит к образованию в объеме бетона «необратимо» раскрытых трещин, не исчезающих после снятия нагрузки. Они пронизываемы для воды и растворенной в ней соли, что (в сочетании с разрушающими факторами циклического замораживания–оттаивания) приводит к ускоренной деструкции бетона и резкому снижению его прочности.

Отметим, что этот процесс отражается и соответствующими закономерными изменениями скорости ультразвука (рис. 1 и 3). В результате, установив факт снижения скорости ультразвука в бетоне периодически контролируемых участков покрытия, можно прогнозировать вероятность снижения качества бетона и определять (прогнозировать) возможность дальнейшей эксплуатации (необходимость ремонта) покрытия.

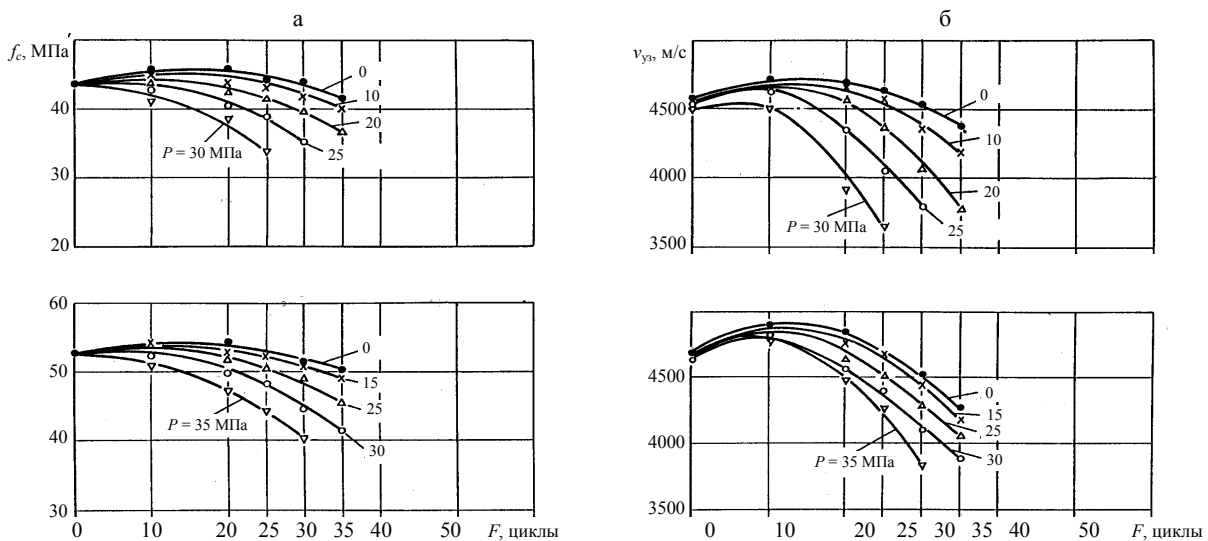


Рис. 3. Тенденция изменения прочности и скорости ультразвука контрольных ($P = 0$) и основных образцов под воздействием циклического замораживания–оттаивания в растворе соли при $t = -(50-55) \text{ }^\circ\text{C}$ и статической механической нагрузки: а – мелкозернистого бетона; б – бетона со щебнем

При испытаниях в солевом растворе подтверждено, что отрицательный эффект от ударных сосредоточенных динамических нагрузок соответствует уровню воздействия на бетон статических нагрузок, превышающих его верхнюю границу трещинообразования, включая снижение в 2–3 раза износоустойчивости образцов бетона.

ВЫВОД

Выявленные по результатам исследований закономерности позволяют понять причины ускоренной деструкции бетона, подверженного в процессе эксплуатации комплексному воздействию среды, усиленному механическими нагрузками. Обобщение полученных данных дает основание для назначения предельных уровней нагрузок на бетон разнообразных покрытий, а также для установления требований к прочности бетона при их проектировании с учетом условий эксплуатации. Взаимосвязь изменений скорости ультразвука, отражающих изменения структуры бетона в процессе эксплуатации, создает необходимые предпосылки для разработки методики оперативного контроля (оценки) состояния и прогнозирования долговечности бетона покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Дементьев, Г. К. Условие долговечности бетона и железобетона / Г. К. Дементьев. – Куйбышев, 1955. – 120 с.
3. Попов, Н. Д. К вопросу об усталости бетона при многократных циклах чередующихся воздействий окружающей среды. Тр. МИСИ им. В. В. Куйбышева: сб. № 15 / Н. Д. Попов, В. А. Невский. – М., 1957. – С. 73–90.
4. Цементный бетон в дорожном строительстве / С. В. Шестоперов [и др.]. – М.: Дориздат, 1950. – 132 с.
5. Стольников, В. В. Исследования по гидротехническому бетону / В. В. Стольников. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1953. – 330 с.
6. Цытович, Н. А. Основания механики мерзлых грунтов / Н. А. Цытович, М. И. Сумгин. – М.: Изд-во АН СССР, 1937. – 432 с.
7. Лыков, А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / А. В. Лыков. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 464 с.
8. Конопленко, А. И. К вопросу теории морозостойкости бетона / А. И. Конопленко // Сб. тр. Ростовского

инженерно-строительного института. – Ростов н/Д., 1958. – Вып. XII.

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. Powers, T. A. working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete / T. A. Powers // J. Am. Coner. Inst. – 1945. – № 4. – V. 16.

12. Powers, T. Theory of volume changes in hardened portland – cement paste during freezing / T. Powers, R. Hel-muth // Proceedings Hig way Research Board. – 1953. – V. 32.

13. Батыновский, Э. И. Особо плотный бетон сухого формования / Э. И. Батыновский. – Минск: НП ООО «Стринко», 2002. – С. 103–108.

14. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В. М. Москвин [и др.]. – 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. – Минск, 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. – Минск: Вышэйш. шк., 1969. – С. 60–69.

19. Гузеев, Е. А. Расчет железобетонных конструкций с учетом кинетики коррозии бетона третьего вида: сб. науч. тр. НИИЖБа / Е. А. Гузеев, Н. В. Савицкий; 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. – Минск: Вышэйш. шк., 1986. – 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. Батыновский, Э. И. Влияние многократных механических нагрузок на свойства тяжелого бетона / Э. И. Батыновский, А. И. Бондарович, П. В. Рябчиков // Строительная наука и техника. – 2007. – № 1 (10). – С. 12–22.

23. Батыновский, Э. И. Влияние технологических факторов на проницаемость вибропрессованного бетона / Э. И. Батыновский, А. И. Бондарович, П. В. Рябчиков // Строительная наука и техника. – 2006. – № 3 (6). – С. 18–25.

24. Берг, О. Я. Высокопрочный бетон / О. Я. Берг, Е. Н. Щербаков, Г. Н. Писанко. – М.: Стройиздат, 1971. – 208 с.

Поступила 21.11.2007