

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ СЕМИНАР

**ВОПРОСЫ ВНЕДРЕНИЯ НОРМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И  
СТАНДАРТОВ ЕВРОПЕЙСКОГО СОЮЗА  
В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА**

(г. Минск, БНТУ — 22–23.05.2013)

УДК 666.972.69

**ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СРЕДЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ  
НАГРУЗОК НА ДИНАМИКУ ИЗМЕНЕНИЙ СВОЙСТВ  
БЕТОНА ЭЛЕМЕНТОВ БЛАГОУСТРОЙСТВА**

*БОНДАРОВИЧ А.И., БАТЯНОВСКИЙ Э.И.*

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

**АННОТАЦИЯ**

Долговечность бетона дорожных, тротуарных покрытий и подобных элементов транспортных коммуникаций и благоустройства в основном оценивается показателями морозостойкости и прочности. В процессе службы бетон покрытий подвергается комплексным физико-химическим воздействиям агрессивной эксплуатационной среды в сочетании со значительными механическими нагрузками, которые оказывают существенное влияние на изменение во времени его структурных характеристик и способны снизить эксплуатационную надежность и долговечность.

**THE SUMMARY**

Durability of concrete road, sidewalk pavement and similar elements of transportation and public works mainly assesses the performance of frost resistance and durability. In the process of concrete coatings is an integrated service of chemical-physical effects of aggressive environment in combination with high mechanical loads, which have a signifi-

cant impact on the time of its structural characteristics and can reduce the operational reliability and durability.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Для оценки морозостойкости бетона (кроме стандартных базовых и ускоренных экспериментальных методов ее определения) существует ряд предложений в виде математических зависимостей для теоретического расчета ее значений. Согласно этим методикам, используя данные о составе бетона, характеристиках цемента и вероятной степени его гидратации, условиях твердения и других, можно с различной степенью достоверности определить ожидаемое значение исходной морозостойкости бетона перед началом эксплуатации. Методики определения фактического состояния бетона на момент оценки в процессе эксплуатации конструкций, в частности, покрытий зон благоустройства поселений, тротуаров, а также дорожных и аэродромных покрытий, отсутствуют. Вместе с тем, именно оценка фактического состояния бетона, определение его «остаточной» морозостойкости и вероятной эксплуатационной надежности и долговечности покрытий позволяет системно контролировать состояние и планировать их эксплуатацию и ремонт.

Наиболее значимыми из предложений для теоретического расчета морозостойкости бетона и ускоренного определения ее значений являются: методика Г.И. Горчакова [10]; более сложное по математическим зависимостям и методике предложение, составившее основу структурно-механического метода ускоренного (ГОСТ 10060.4-95) определения морозостойкости бетона (проверка этого метода, выполненная в БНТУ в сравнительных испытаниях с ГОСТ 10060.0...2-95, показала серьезный уровень расхождения данных, достигавшего в некоторых случаях величины в 1,5...2 раза); в РУП БелНИИС разрабатывается метод, сочетающий аналитический расчет (включает более 20 формул) и измерение деформаций в период оттаивания предварительно замороженного образца бетона. По существу этот метод (с рядом изменений) основывается на результатах работ Горчакова Г.И. и его научной школы, выполненных в 50...60-ых годах прошлого века, на базе которых в ГОСТ 10060.3-95 зафиксирована методика дилатометрического метода ускоренного определения морозостойкости с помощью специального устройства – дилатометра (при одноразовом заморажива-

нии образца бетона и фиксации его деформаций в этот период); предложенная в последние годы и обоснованная в работах В.В. Бабицкого [1] методика и математическая зависимость, отражающая взаимосвязь морозостойкости с составом бетона, качеством цемента, степенью его гидратации (с учетом условий твердения) и с рядом других факторов, для оценки морозостойкости бетона на стадии изготовления изделий (конструкций).

Как следует из изложенного, все эти предложения (включая стандартные определения) позволяют сориентироваться в оценке вероятной морозостойкости бетона, как исходного материала, но не обеспечивают возможности промежуточного (например, периодического) контроля морозостойкости и оценки долговечности покрытий, изделий или конструкций в процессе эксплуатации.

С этой целью предлагается соответствующая методика (на примере мелкозернистого бетона и бетона с крупным заполнителем для элементов благоустройства), основные положения которой изложены в настоящем материале. Она разработана на основе результатов комплексного исследования закономерностей изменения свойств бетона в процессе циклического замораживания-оттаивания в водной или солевой среде, при отсутствии или в сочетании с воздействием на бетон механических (статической или динамической) нагрузок [2,3,4].

### **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕОРИТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРИЧИНАХ И МЕХАНИЗМЕ МОРОЗНОЙ ДЕСТРУКЦИИ БЕТОНА**

Обобщение разнообразных гипотез [10], включая основы теории миграции влаги в пористых телах, 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 защемленной 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 гидрокристаллическими 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, как за счет образования нерастворимых в воде 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 [11] следующим. Во-первых, 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. При этом механизм образования и увеличения дефектов структуры может проявиться как за счет роста кристаллов соли, так и за счет возникновения трещин при «обжати» последних прослойками (оболочками) цементного камня при «отрицательных» деформациях в период охлаждения бетона. Возникающие в обоих случаях растягивающие усилия в цементном камне, вызывают появление в нем трещин. Во-вторых, усилением процесса миграции жидкой фазы и ростом влагоемкости бетона. Соответственно под нагрузкой в нем возрастает, в сравнении с водой, проявление "эффекта Ребиндера", т.е. расклинивающего действия тонких пленок жидкости-раствора в устье трещин (дефектов структуры). В-третьих, возникает напряженное состояние на уровне микроструктуры цементного камня из-за локально проявляющегося эффекта от перепада (градиента) температур (эндокринный эффект), сопровождающего процесс «очагового» растворения – кристаллизации соли. Кроме отмеченного, понижение температуры замерзания раствора соли, в сравнении с водой, 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 различных 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, то есть, сопровождается постоянным деструктивным воздействием на бетон.

Кроме физико-химической агрессии среды в процессе эксплуатации бетон дорожных покрытий, элементов мощения и благоустройства подвергается интенсивному механическому воздействию: истирающим, сжимающим, изгибающим, ударным нагрузкам различной интенсивности и значений, которые многократно повторяются во времени. Не смотря на то, что еще в 30-ых годах XX века Ю.А. Нилендер выявил непосредственное влияние напряженного состояния бетона от внешних (и «внутренних») воздействий на его морозостойкость и долговечность и в 50 – 60-х годах под руководством В.М. Москвина [11] это направление исследований получило развитие, накопленной информации было недостаточно для того, чтобы попытаться количественно оценить влияние механических нагрузок на долговечность бетона, особенно с учетом того факта, что они оказывают существенное влияние на его проницаемость и прочность [2], а также на морозо- и солестойкость [3,4]. Вместе с тем такая оценка необходима не только для разработки предлагаемой методики, но и для определения уровня требований к физико-техническим характеристикам бетона при проектировании объектов различного назначения. С этой целью были выполнены экспериментальные исследования, важнейшие результаты которых частично представлены в настоящей статье и явились базисом предлагаемой методики.

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Преследовали цель установления закономерностей изменения свойств бетона: прочности (на сжатие); проницаемости; изменений массы образцов; водо-, соле-, морозостойкости (как в среде – воде,

так и в 5 % растворе NaCl), под комплексным воздействием сочетаний различных факторов: циклического замораживания-оттаивания, насыщения в воде или растворе NaCl – высушивания, многократного приложения механических нагрузок (статических и динамических) различной величины и интенсивности и др. С учетом того, что продолжительное воздействие этих агрессивных по отношению к бетону факторов должно было в какой-то момент привести к нарушениям его структуры, одновременно отслеживали изменение скорости прохождения ультразвукового импульса (далее – скорость ультразвука) во взаимосвязи с контролируемыми свойствами бетона: прочностью, изменениями массы, водопроницаемостью (водосодержанием). Было выявлено наличие устойчивой взаимосвязи между изменениями в величине прочности бетона в процессе циклических испытаний на водо-, соле- и морозостойкость (как в среде – воде, так и в 5 % растворе NaCl) и скоростью ультразвука, как при "сквозном", так и при ее определении прозвучиванием с поверхности. При этом данная взаимозависимость: "скорость ультразвука – прочность", сохранялась как в начальный период времени испытаний, характеризовавшийся ростом прочности образцов бетона, так и в дальнейшем, т.е. в период сохранения ее на некотором, примерно постоянном уровне, и при последующем снижении, отражающем процесс начала и развития деструкции бетона. Существенной особенностью взаимосвязи скорости ультразвука ( $V_{уз}$ ) и прочности бетона явилось то, что скорость ультразвука начинает снижаться раньше и значительно (в относительных и абсолютных величинах), чем это происходит с прочностью бетона. То есть, структурные изменения в бетоне под влиянием циклических воздействий при испытаниях или эксплуатации фиксируются с помощью ультразвука раньше, чем они приводят к снижению его прочности. На этом основании и результатах выполненных экспериментов, частично представленных на рис. 1 и 2 в виде закономерностей изменений в процессе испытаний (под влиянием различных сочетаний воздействующих факторов) массы образцов бетона (рис. 1а, 2а), его прочности (рис. 1б, 2б), скорости ультразвука (рисунок 1в, 2в), разработана и предлагается методика оценки фактического состояния бетона эксплуатируемых покрытий. Для этого по ее положениям (используя данные контроля влажности и скорости ультразвука) определяют количество "накопленных" к моменту проверки бетона цик-

лов стандартных испытаний, а затем, с учетом известных данных об его исходной (требуемой) морозостойкости, устанавливают количество циклов "остаточной" морозостойкости бетона и на этом основании – ожидаемого периода эксплуатации (долговечность).

При установлении представленных на рисунок 1 и 2 зависимостей (и в исследованиях в целом) использовали составы мелкозернистого бетона (прочностью (28 сут.) в диапазоне 40...50 МПа) и бетона

( $f_c \sim 45...60$  МПа) со щебнем гранитным (на материалах стандартного и отличающегося от него качества), цементах белорусских заводов (без и с минеральными добавками), варьируя расход вяжущего (350...600 кг на  $1\text{ м}^3$  бетона); водоцементное отношение (0,3...0,45), а также степень уплотнения и условия твердения образцов [2, 3, 4].

Статическую механическую нагрузку на образцы бетона имитировали загрузкой их после оттаивания (через каждые 5 циклов замораживания-оттаивания) под прессом с усилием, примерно равным 20; 30; 50 и 70 % от прочности бетона в проектном возрасте (28 сут.).

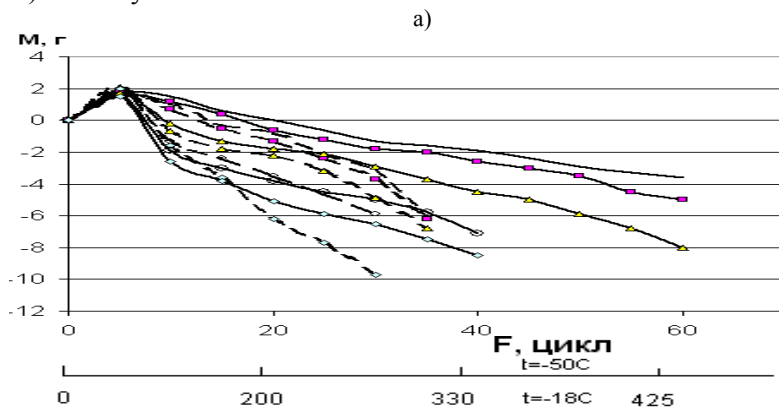
Динамическую (ударную, сосредоточенную) механическую нагрузку на оттаявшие образцы бетона имитировали 10-ю ударами копра – плотномера динамического (СТБ 1242-2000; масса груза  $\sim 2,5$  кг; высота падения – 300 мм; точка касания – острие конуса с углом при вершине 60 град.) по одной из их поверхностей через каждые 5 циклов замораживания-оттаивания.

Для получения сравнительных характеристик в каждой партии образцов бетона имелись контрольные, которые подвергали циклическому замораживанию-оттаиванию без дополнительного воздействия механических нагрузок.

Обработка и оценка результатов испытаний выполнена в соответствии с требованиями действующих нормативов. Их анализ, включая данные рисунок 1, показал, что статическая механическая нагрузка (сжатие) на бетон не оказывает существенного влияния на его свойства при циклических воздействиях до уровня  $\sim 40$  % от прочности (кубиковой) проектного возраста; ее повышение до 50 % активизирует деструктивные явления, а превышение (60...70) %-го уровня сопровождается ускоренным снижением долговечности бе-

тона. Это непосредственно связано с тем, что при нагрузке более 40 % превышает предел нижней границы, а более 60 % - верхней границы трещинообразования в бетоне [5-8], которое затем интенсифицируется жестким циклическим воздействием на структуру бетона при замораживании-оттаивании (особенно в растворе соли). Динамическая ударная нагрузка (рисунок 2) на бетон оказывает такое деструктивное воздействие на его структуру, которое соответствует загрузению образцов сжатием на уровне > 60 % проектной прочности бетона, т.е. резко снижает его сопротивляемость последующему циклическому замораживанию-оттаиванию (особенно в растворе соли). При этом ускоренное снижение прочности бетона наблюдается в том случае, если направление трещин, образующихся «под ударом», совпадает с направлением последующего действия нагрузки при сжатии образцов бетона, что способствует интенсивному "развитию" их и снижению прочности.

Выявленные закономерности "поведения" бетона характерны и для других циклических воздействий в сочетании с механическими нагрузками, например, насыщения-высушивания при испытаниях на водо- и солестойкость. При этом под действием ударной (сосредоточенной) нагрузки резко снижается (и в меньшей мере под действием статической нагрузки, даже превышающей 60 %-ый уровень) износоустойчивость бетона.





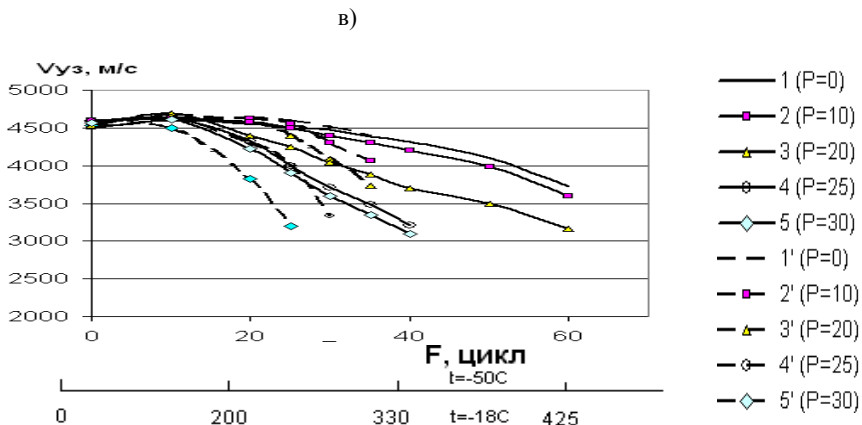
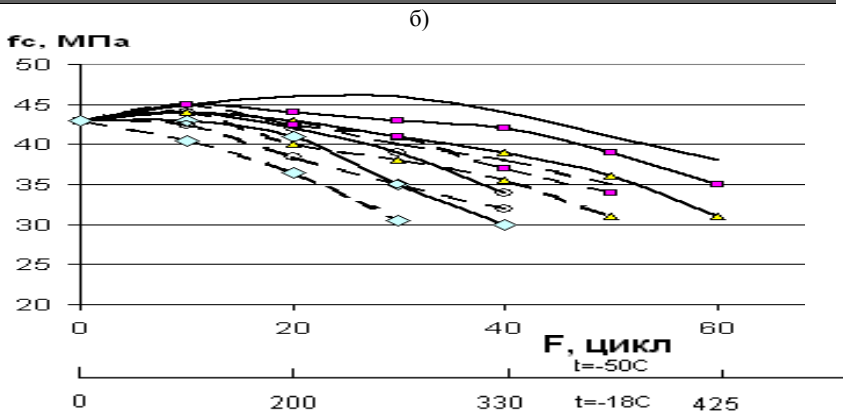


Рисунок 1. Тенденции изменения массы (а), прочности (б) и скорости ультразвука (в) в процессе испытаний на морозостойкость в «среде-воде» и 5% растворе NaCl при воздействии статической нагрузки различного уровня (0...30 МПа; 0...70% от проектной).

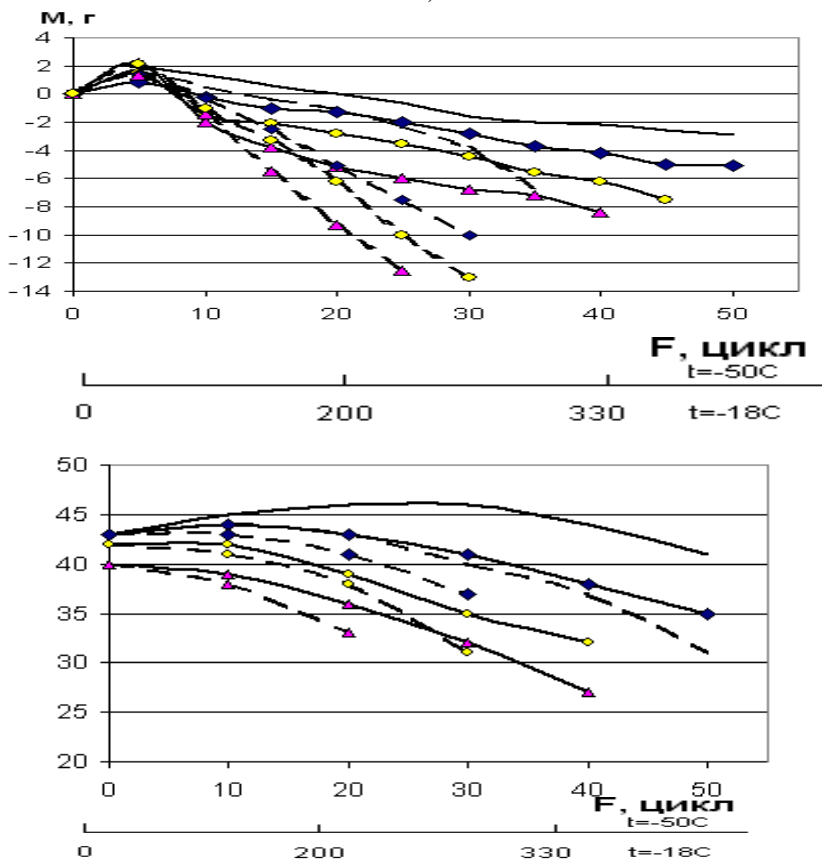
Условные обозначения: сплошные линии №№1-5 для «воды-среды»; пунктирные линии №№1'-5' для 5% р-ра NaCl

Динамическая ударная нагрузка (рисунок 2) на бетон оказывает такое деструктивное воздействие на его структуру, которое соответствует загрузению образцов сжатием на уровне  $> 60\%$  проектной прочности бетона, т.е. резко снижает его сопротивляемость последующему циклическому замораживанию-оттаиванию (особенно

в растворе соли). При этом ускоренное снижение прочности бетона наблюдается в том случае, если направление трещин, образующихся «под ударом», совпадает с направлением последующего действия нагрузки при сжатии образцов бетона, что способствует интенсивному "развитию" их и снижению прочности.

Выявленные закономерности "поведения" бетона характерны и для других циклических воздействий в сочетании с механическими нагрузками, например, насыщения-высушивания при испытаниях на водо- и солестойкость. При этом под действием ударной (сосредоточенной) нагрузки резко снижается (и в меньшей мере под действием статической нагрузки, даже превышающей 60 %-ый уровень) износоустойчивость бетона.

a)



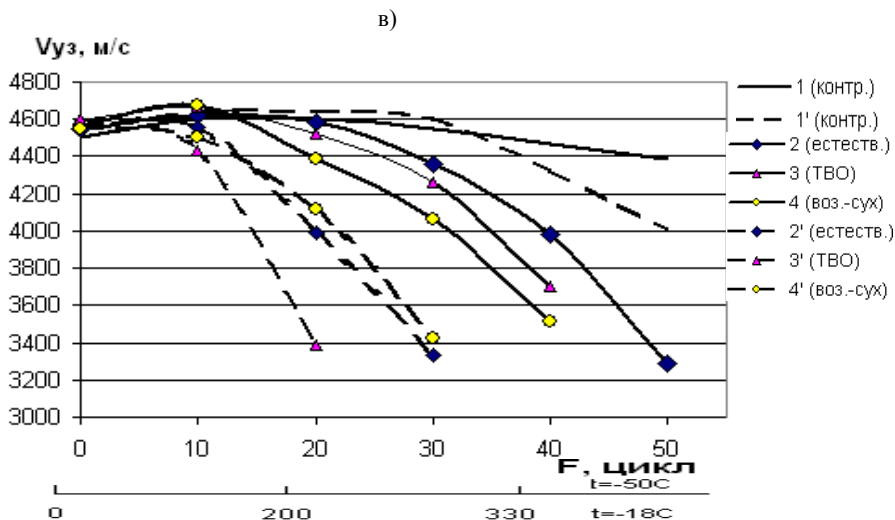


Рисунок 2. Тенденции изменения массы (а), прочности (б) и скорости ультразвука (в) в процессе испытаний на морозостойкость в «среде-воде» (сплошные линии) и 5% растворе NaCl (пунктирные линии) при воздействии динамической нагрузки и в зависимости от различных условий твердения образцов.

Условные обозначения: 1-1' – контрольные образцы (без динамической нагрузки), 2-2' – твердевшие с гидроизоляцией поверхности (под пленкой), 3-3' – пропаренные с дальнейшим хранением на воздухе, 4-4' – твердевшие в воздушно-сухих условиях

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бабицкий В.В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона: Дис. докт. технич. наук: БНТУ, - Минск, 2005. – С. 118-131.
2. Батяновский Э.И. Влияние технологических факторов на проницаемость вибропрессованного бетона /Э.И. Батяновский, А.И. Бондарович, П.В. Рябчиков //Строительная наука и техника. – 2006. - № 3 (6). – С.18-25.
3. Батяновский Э.И. Влияние многократных механических нагрузок на свойства тяжелого бетона /Э.И. Батяновский, А.И. Бондарович, П.В. Рябчиков //Строительная наука и техника. – 2007. - № 1 (10). – С.12-22.

4. Батяновский Э.И. Морозо- и солестойкость бетона, подверженного механическим нагрузкам/ Э.И. Батяновский, А.И. Бондарович // Вестник БНТУ. – 2007. № 1. – С. 5-16.
5. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. М.: Госстройиздат, 1962. – 96 с.
6. Берг О.Я. О предельном состоянии железобетонных конструкций по долговечности// Бетон и железобетон, 1964. № 11. – С. 486-488.
7. Берг О.Я., Галузо Г.С. Усталостная прочность аглопоритобетона// Бетон и железобетон, 1969. № 10. – С. 21-23.
8. Берг О.Я. Высокопрочный бетон / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко. – М.: Стройиздат, 1971. – 208 с.
9. Галузо Г.С. Исследование прочности и деформации аглопоритобетона при действии статической и многократноповторяющейся сжимающих нагрузок, Автореф. дисс. канд. технич. наук, БПИ, Минск, 1969. – 25 с.
10. Горчаков Г.И., Капкин М.М., Скрамтаев Б.Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. – М.: Стройиздат, 1965.- 195 с.
11. Москвин В.М., Подвальный А.М. Морозостойкость бетона в напряженном состоянии. Бетон и железобетон, 1960, № 2. – С. 58-64.