

**Бондарович Александр Иванович**, старший научный сотрудник,  
УО «Белорусский национальный технический  
университет», г. Минск (Беларусь)

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

## **МЕТОДИКА УСКОРЕННОЙ ОЦЕНКИ МОРОЗОСТОЙКОСТИ ВИБРОПРЕССОВАННОГО БЕТОНА В ИЗДЕЛИЯХ**

## **TECHNIQUE OF THE ACCELERATED ASSESSMENT OF FROST RESISTANCE OF THE VIBROPRESSED CONCRETE IN PRODUCTS**

### **АННОТАЦИЯ**

*В статье изложены основные положения предлагаемой ускоренной методики определения морозостойкости тяжелого конструкционного мелкозернистого и с крупным заполнителем бетона вибропрессованных изделий для дорожных (тротуарных) покрытий. Она позволяет оценивать показатель морозостойкости бетона непосредственно в изделиях без циклических испытаний замораживанием-оттаиванием. В основе методики – взаимосвязь и взаимозависимость между состоянием структуры бетона (оцениваемой по влагосодержанию в насыщенном водой (раствором 5% NaCl) состоянии), скоростью распространения в нем ультразвукового импульса и установленной (путем прямых экспериментальных испытаний на морозостойкость бетона) закономерностью изменений его морозостойкости, отражаемой соответствующими изменениями скорости ультразвука. Многократная проверка предлагаемой методики ускоренной оценки морозостойкости бетона при параллельном экспериментальном ее определении по второму и третьему методу ГОСТ 10060.2-95 подтвердила возможность ее использования для оперативного контроля этого показателя.*

### **ABSTRACT**

*In article basic provisions of the offered accelerated technique of determination of frost resistance heavy constructional fine-grained and with large filler of concrete of the vibropressed products for road (sidewalk) coverings are stated. She allows to estimate an indicator of frost resistance of concrete directly in products without cyclic tests by freezing thawing. At the heart of a technique – interrelation and*

*interdependence between a condition of structure of concrete (estimated on moisture content in a state sated with water (solution of 5% of NaCl)), distribution speed in it an ultrasonic impulse and established (by direct experimental tests for frost resistance of concrete) regularity of changes of its frost resistance reflected by corresponding changes of speed of ultrasound. Repeated check of an offered technique of the accelerated assessment of frost resistance of concrete at its parallel experimental definition on the second and third state standard specification 10060.2-95 method confirmed possibility of its use for an operating control of this indicator.*

## **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.

Наиболее значимыми из предложений для теоретического расчета морозостойкости бетона и ускоренного определения ее значений являются: методика Г.И. Горчакова [1]; 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 2 раза); в РУП «Институт БелНИИС» под руководством проф. Н.П. Блещика [2] разработан и совершенствуется 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 замораживании образца бетона и фиксации его деформаций в этот период); предложенная в последние годы и обоснованная в работах В.В. Бабицкого [3] 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), а также ряд других предложений [4,5 и др.].

Как следует из изложенного, эти предложения (включая стандартные определения) либо требуют расширенной информации о материалах для бетона, условиях его формирования и твердения и т.д., либо характеризуются значительной продолжительностью испытаний, либо требуют наличия специального оборудования для их проведения.

Предлагаемая методика доступна в осуществлении и реализации по фактическому – «физическому» – состоянию порового пространства испытываемого бетона, оцениваемого с поверхности изделий диэлькометрическими влагомерами с планарными датчиками (МГ-4; ВСКМ-12; ВИМС-1,0 и др.), и легко определяемой скорости распространения ультразвука, например, тестером «УК 1401», оснащенного датчиками «точечного» приложения (конусные датчики). Общий период испытаний составляет 4-5 дней, с учетом 96-тичасового насыщения бетона по ГОСТ 10060.0-95.

## **Теоретико-практическое обоснование методики**

Современные теоретические представления о причинах и механизме морозной деструкции бетона, а также о технологических мероприятиях для повышения его долговечности сформировались на основе исследований, выполненных в 30...60-х годах XX века. Обобщение разнообразных гипотез [1, 6-14], включая основы теории миграции влаги в пористых телах [15, 16], 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 [17], 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 [18-25] следующим. Во-первых, наблюдается кристаллизационное давление 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 «обжатии» 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, имеет место усиление 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.

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 воздействием циклического замораживания-оттаивания, насыщения в воде или растворе NaCl – высушивания. 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 ( $V_{uz}$ ) 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. Это явилось основанием для разработки предлагаемой методики.

## Основные положения методики

Методика включает этапы подготовки образцов (изделий) бетона, определение влажности бетона, определение скорости ультразвука, оценку показателя морозостойкости бетона.

Подготовка образцов (изделий) включает:

- установление вида бетона (мелкозернистый или с крупным заполнителем);
- насыщение бетона в 5%-ом растворе NaCl (или в воде) по ГОСТ 10060.0-95.

Определение влажности бетона осуществляют с помощью диэлькометрических влагомеров с планарными датчиками для контроля влажности с поверхности (прилегающего к ней слоя бетона), базирующихся на диэлькометрическом методе ее измерения (ГОСТ 21718-84).

Скорость ультразвука в бетоне определяют с помощью тестеров ультразвуковых, оснащенных датчиками «точечного» приложения с базой (межосевым расстоянием) в 150 мм, по положениям ГОСТ 17624-87.

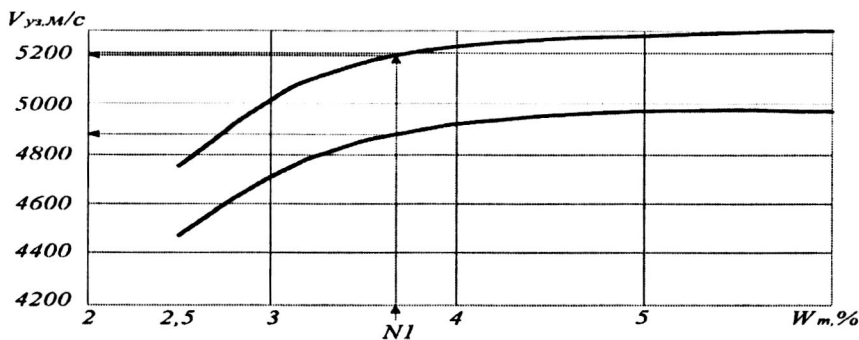
Оценку показателя морозостойкости бетона выполняют, используя установленные величины средних значений влажности бетона ( $W_{mi}$ , %), полученные по результатам замеров на требуемом по ГОСТ 10060.0-95 количестве образцов, и данные рисунка 1 (а; б; в; г, – приведены на примере мелкозернистого бетона). По ним определяют область вероятных значений скорости ультразвука и стадию, к которой относится испытываемый бетон по состоянию его структуры.

Для этого вначале возводят перпендикуляр от значения на горизонтальной оси  $W_{mi}$  до пересечения с нижней и верхней границей области вероятных, соответственно, наименьшего и наибольшего значений (обозначенных на рис. 1а и 1б сплошными графическими линиями) скорости ультразвука и определяют эти значения  $V_{yz}$ , проецируя точки пересечения на вертикальную ось.

Используя установленную область вероятных значений скорости ультразвука, ограниченную величинами наименьшей ( $V_{yz}^{min}$ ) и наибольшей ( $V_{yz}^{max}$ ) его скорости, оценивают, к какой стадии по состоянию структуры относится испытываемый бетон контролируемого участка, а именно: к стадии I по рисунку 1а или к стадии II по рисунку 1б.

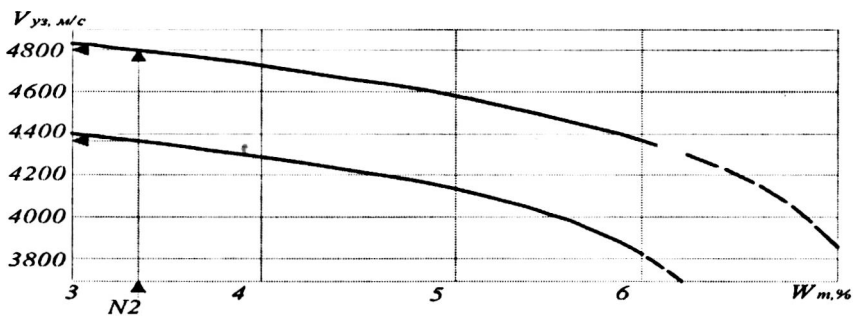
Для этого сравнивают величину среднего значения скорости ультразвука оцениваемого количества образцов ( $V_{yzi}$ , м/с) с областью вероятных ее значений в пределах:  $V_{yz}^{min} \dots V_{yz}^{max}$ , м/с, относящихся к стадиям I или II. Затем, используя графики и данные рисунков 1в или 1г (в зависимости от установленной стадии, к которой относится бетон по состоянию структуры), и величину среднего значения скорости ультразвука в бетоне образцов  $V_{yzi}$ , м/с, определенную по данным замеров, оценивают показатель морозостойкости бетона для испытательной среды 5 % водного раствора NaCl при температуре минус 18°С.

а)

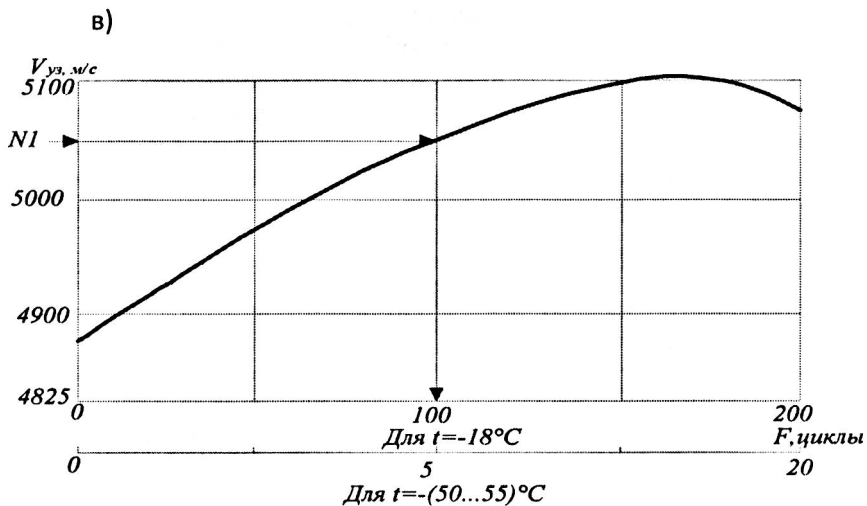


Область установленных значений скорости ультразвука ( $V_{uz}$ , м/с) вибропрессованного мелкозернистого бетона в зависимости от влажности ( $W_m$ , %) на стадиях I и II.

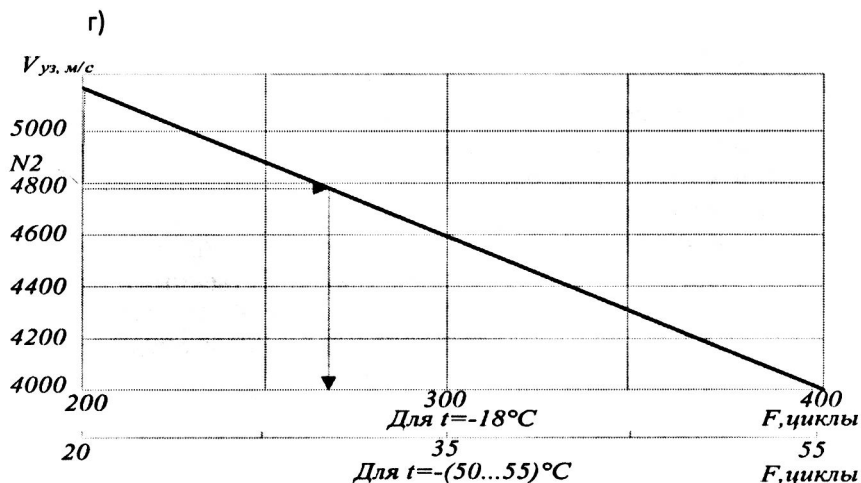
б)



Область установленных значений скорости ультразвука ( $V_{uz}$ , м/с) вибропрессованного мелкозернистого бетона в зависимости от влажности ( $W_m$ , %) на стадии III.



Зависимость «скорость ультразвука – морозостойкость» (циклы) для вибро-прессованного мелкозернистого бетона на стадиях I и II.



Зависимость «скорость ультразвука – морозостойкость» (циклы) для вибропрессованного мелкозернистого бетона на стадии III.

**Рисунок 1.** Графические зависимости для оценки морозостойкости мелкозернистого вибропрессованного бетона



Для этого проецируют точку с вертикальной оси (рисунка 1в или рисунка 1г), соответствующую величине средней скорости ультразвука в бетоне образцов ( $V_{\text{усл}}$ ), до пересечения с графической зависимостью. Последующая проекция полученной точки пересечения на горизонтальную ось дает значение примерного количества циклов стандартных испытаний ( $N_{\text{ФТ}}$ ), которые может выдержать бетон при их осуществлении.

В случае, если скорость ультразвука окажется для мелкозернистого бетона более 5300 м/с, что свидетельствует о его более высокой плотности или о наличии в нем крупного заполнителя, не обнаруживаемого визуально, следует пользоваться зависимостями, установленными для бетона со щебнем (в статье не приводятся).

При разработке изложенной в своих основных положениях методики ускоренной оценки морозостойкости вибропрессованного бетона исходили из экспериментально (и многократно) установленных данных. Из них следует, что, обеспеченным сроком эксплуатации тротуарных покрытий,строенных из вибропрессованных элементов мощения, средняя плотность бетона которых была  $\rho_6 \geq 2250$  кг/м<sup>3</sup> при водопоглощении  $W_m \leq 5\%$  для мелкозернистого бетона и  $\rho_6 \geq 2350$  кг/м<sup>3</sup> при  $W_m \leq 4,5\%$  для бетона со щебнем и выдержавших стандартизированные испытания на морозостойкость с обеспечением марки «F250» в 5 % растворе NaCl, целесообразно считать период, который оценивается показателем морозостойкости, соответствующим 300 циклам испытаний по 2-му методу контроля. Этот вывод сделан на основании экспериментальных данных, полученных при разработке методики для оценки «остаточной» морозостойкости и долговечности бетона эксплуатируемых дорожных (тротуарных) покрытий, отраженных в публикациях авторов [25, 26]. Было установлено, что мелкозернистый бетон образцов (изделий) с указанными ранее качественными характеристиками и после 400 циклов характеризовался прочностью более 30 МПа, а со щебнем гранитным – более 35 МПа, при удовлетворительном качестве поверхности образцов (изделий).

Выявленные в данных исследованиях закономерности «поведения» бетона при циклических испытаниях на морозостойкость положены в основу предлагаемой методики ускоренной оценки этой его характеристики.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Предложена методика ускоренного контроля (оценки) морозостойкости тяжелого (мелкозернистого и содержащего крупный заполнитель)

бетона для бетонных элементов дорожных (тротуарных) покрытий, позволяющая за 4-5 суток определить эту характеристику бетона.

Принятый для оценки характеристик испытываемого бетона (изделий) инструментарий неразрушающего контроля для определения влажности бетона и скорости ультразвука стандартизирован и доступен, что обеспечивает возможность ее широкого применения.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Горчаков, Г.И., Капкин, М.М., Скрамтаев, Б.Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. – М.: Стройиздат, 1965. – 195 с.
2. Блещик, Н.П., Лазаренко, О.В. Основы технологии и методов контроля качества морозостойкости бетонов // Архитектурное строительство. 2001, №6. – С. 38-41.
3. Бабицкий, В.В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона: Дис. докт. технич. наук: БНТУ, - Минск, 2005. – С. 118-131.
4. Шейкин, А.Е., Добшиц, Л.М. Цементные бетоны высокой морозостойкости. – Л.: Стройиздат, 1989, – 128 с.
5. Ковшар, С.Н. Оценка и прогнозирование морозо- и солестойкости тяжелого бетона с учетом изменения конструктивных и деструктивных факторов: Дис... канд. техн. наук: 05.23.05 – строительные материалы и изделия. – Мн., 2010. – 175 с.
6. Collins, A. The destruction of concrete by frost. – Institute of Civil Engineers, 1944 nov. – P. 5412.
7. Powers, T. A. Working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. – J. Am. Coner. Inst., 1945, № 4. – V. 16.
8. Powers, T., Helmuth, R. Theory of volume changes in hardened portland – Cement paste during freezing / Proceedings Hig way Research Board, 1953: – V. 32.
9. Шестоперов, С.В. и др. Цементный бетон в дорожном строительстве. – М.: Дориздат, 1950. – 132 с.
10. Стольников, В.В. Исследования по гидротехническому бетону. – М.: – Л.: Госэнергоиздат, 1953. – 330 с.
11. Дементьев, Г.К. Условие долговечности бетона и железобетона. – Куйбышев: Куйбышевское книгоиздат, 1955. – 120 с.
12. Попов, Н.Д., Невский, В.А. К вопросу об усталости бетона при многократных циклах чередующихся воздействий окружающей среды. Тр. МИСИ им. В.В. Куйбышева. Сб. № 15. – М., 1957. – С. 73–90.

13. Конопленко, А.И. К вопросу теории морозостойкости бетона. В сб. тр. Ростовского инженерно-строит института. Вып. XII. – Ростов – на-Дону, 1958.
14. Мошанский, Н.А. Повышение стойкости строительных материалов и конструкций, работающих в условиях агрессивных сред. – М.: Госстандарт, 1962. – 235 с.
15. Цытович, Н.А., Сумгин М.И. Основания механики мерзлых грунтов. – М.: Изд. АН СССР, 1937. – 432 с.
16. Лыков, А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. – М.: – Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 464 с.
17. Батяновский, Э.И. Особо плотный бетон сухого формирования. – Мн.: НП ООО «Стринко», 2002. – С. 103–108.
18. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев и др. – М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.
19. Ахвердов, И.Н., Станишевская, И.В. Механизм разрушения пористых материалов при насыщении их солями / ДАН БССР. – Минск, 1967. – Т. 11, № 4. – С. 320–323.
20. Алексеев, С.Н., Розенталь, Н.К. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде. – М.: Стройиздат, 1976. – 205 с.
21. Иванов, Ф.М. Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии. – М.: Транспорт, 1968. – 175 с.
22. 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.
23. Гузев, Е.А., Савицкий, Н.В. Расчет железобетонных конструкций с учетом кинетики коррозии бетона третьего вида // 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. – Мн.: Выш. Шк., 1986 г. – 200 с.
25. Батяновский, Э.И., Бондарович, А.И. Морозо- и солестойкость бетона, подверженного механическим нагрузкам // Вестник БНТУ, 2007. – №1. – С.12–12.
26. Батяновский, Э.И., Бондарович, А.И. Оценка эксплуатационной долговечности тяжелого бетона по критерию «остаточной» морозостойкости // Автомобильные дороги и мосты, 2010.– №2(6). – С. 49–59.

*Статья поступила в редколлегию 25.09.2014*