

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 666.972.53  
693.54

БОНДАРОВИЧ  
Александр Иванович

**ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ  
ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СТРУКТУРУ И МОРОЗОСТОЙКОСТЬ  
ВИБРОПРЕССОВАННОГО ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**по специальности**  
**05.23.05 – Строительные материалы и изделия**

Минск, 2015

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель

**Батяновский Эдуард Иванович,**  
доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой «Технология бетона и  
строительные материалы» Белорусского  
национального технического  
университета, г. Минск

Официальные оппоненты:

**Семенюк Славик Денисович,**  
доктор технических наук, доцент, зав.  
кафедрой «Строительные конструкции,  
здания и сооружения» ГУВПО  
«Белорусско-Российский университет»,  
г. Могилев;

Оппонирующая организация

**Коньков Вячеслав Викторович,**  
кандидат технических наук, доцент,  
зам. генерального директора РУП  
«Институт БелНИИС»

РУП Государственное предприятие  
«Институт жилища – НИПТИС  
им. Атаева С.С.»

Защита состоится 18 июня 2015 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.05 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, главный корпус, ауд. 202. Телефон ученого секретаря 8(017) 265-95-87. E-mail: [sawa1950@mail.ru](mailto:sawa1950@mail.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, следует отправлять на имя ученого секретаря по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, Белорусский национальный технический университет.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «    »мая 2015 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
доктор технических наук, доцент

П.И. Юхневский

© Бондарович А.И., 2015  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2015

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами**

Работа содержит результаты исследований автора, полученные при выполнении в БНТУ заданий ГНТП «Строительные материалы и технологии» по договорам с Минстройархитектуры Республики Беларусь №37-ФН/03 от 25.11.2003 г. (доп. соглашение №59/2 от 15.03.2005 г.) в период 2003...2005 гг. и № 76-ГФН/06 от 30.11.2006 г. (доп. соглашение №2/3 от 04.02.2008 г.) в период 2006...2008 гг. с задачами разработки методики оценки и прогнозирования долговечности бетона элементов благоустройства и разработки физико-технологических параметров их формирования вибропрессованием, что соответствует Перечню приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011 – 2015 гг., утвержденного постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 г. № 585.

**Цель и задачи исследования.** Цель исследования – выявление закономерностей структурных изменений и разработка методики оперативной оценки морозостойкости вибропрессованного бетона элементов благоустройства и ожидаемой долговечности устроенных из них и эксплуатируемых покрытий, с учетом комплексных физико-механических воздействий на бетон.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- установить закономерности взаимосвязи и взаимозависимости физико-технических характеристик бетона, определяющих его проницаемость, с технологическими факторами формирования изделий способом вибропрессования;
- установить закономерности изменения прочности и прочности вибропрессованного бетона в процессе циклических испытаний на морозостойкость (как в водной среде, так и в солевом (5%-й раствор NaCl) растворе) без приложения механических нагрузок и под дополнительным воздействием статической нагрузки (сжатие-отпуск), а также динамической (ударной, сосредоточенно приложенной) нагрузки, которые имитируют механические воздействия на покрытия в процессе эксплуатации;
- установить закономерности изменений скорости распространения ультразвукового импульса (скорости ультразвука) в процессе циклических испытаний бетона на морозостойкость в разных средах (вода, раствор NaCl) как при отсутствии, так и при наличии дополнительных механических нагрузок;
- разработать методику оперативной оценки фактического состояния вибропрессованного бетона элементов благоустройства и ожидаемой долговечности эксплуатируемых покрытий с учетом совокупности деструктивных факторов, воздействующих на бетон;
- разработать методику ускоренной оценки морозостойкости бетона вибропрессованных изделий для устройства покрытий.

**Научная новизна** результатов диссертационного исследования заключается в развитии и дополнении автором теоретических и эмпирических представлений о морозной деструкции конструкционного тяжелого бетона в недостаточно изученной области – при совместном действии циклического замораживания-оттаивания и механических нагрузок. Автором установлено, что такое комплексное воздействие приводит к ускоренному накоплению структурных дефектов в бетоне и

2 – 3 - кратному снижению его морозостойкости и долговечности, и предложена методика количественной оценки этих изменений, позволяющая определить степень деструкции вибропрессованного бетона в процессе эксплуатации по количеству «пройденных» им циклов замораживания-оттаивания, соответствующих стандартным испытаниям на морозостойкость. На этой основе с использованием разработанных автором «приведенных» циклов, отражающих фактические условия эксплуатации изделий из вибропрессованного бетона, оценить его «остаточную» морозостойкость и ожидаемый период дальнейшей эксплуатации бетона.

Новыми научными данными является также установленная автором закономерность, согласно которой скорость ультразвука в испытываемом (или – эксплуатируемом) бетоне начинает снижаться ранее, чем это отражается в снижении его прочности. В результате обеспечивается возможность раннего обнаружения начала развития процесса деструкции бетона и подтверждается адекватность оценки состояния его структуры неразрушающим методом контроля с помощью ультразвука.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- методика оперативной оценки фактического состояния вибропрессованного бетона элементов благоустройства (тротуарных и иных плит, бортовых и иных камней) и ожидаемой (остаточной) морозостойкости и долговечности устроенных из них и эксплуатируемых покрытий (с учетом комплексных физико-механических воздействий на бетон), позволяющая осуществлять плановое или контрольное наблюдение за их состоянием с использованием методов неразрушающего контроля влажности бетона и скорости ультразвука в нем, заблаговременно планировать ремонтные мероприятия или замену покрытий, а также оценить возможность повторного использования изымаемых элементов мощения;

- методика ускоренной оценки морозостойкости бетона вибропрессованных изделий – элементов благоустройства (мощения), не подвергавшихся эксплуатации, позволяющая осуществить испытания в течение 5 дней с использованием методов неразрушающего контроля влажности бетона и скорости ультразвука в нем (без проведения циклических испытаний) и определить данный показатель, а на этом основании вносить (при необходимости) корректировки в технологический процесс изготовления изделий;

- результаты экспериментальных исследований по установлению закономерностей изменений в структуре вибропрессованного бетона под циклическим воздействием замораживания-оттаивания в водной среде и растворе NaCl при отсутствии и наличии дополнительного воздействия статической и динамической (ударной) нагрузок, что позволило установить возрастающее деструктивное влияние статической нагрузки, превышающей уровень в 50 % от его проектной прочности, и, особенно, превышающей 70 % уровень, а также ударной сосредоточенно приложенной динамической нагрузки, приводящих к резкому снижению устойчивости бетона при циклических воздействиях испытательной и эксплуатационной среды;

- экспериментально выявленные закономерности изменений скорости распространения ультразвукового импульса в бетоне, подверженном комплексному воздействию размораживания и механических нагрузок, которые подтверждают взаимосвязь этих изменений с нижней (не менее 40% проектной прочности бетона) и верхней (не менее 70% ее уровня) границами трещинообразования «по О.Я. Бергу»

и отражают соответствующие изменения состояния структуры (пористости) бетона, что позволяет количественно (по установленным значениям влажности и скорости ультразвука) оценить степень морозной деструкции бетона и по разработанной методике рассчитать его «остаточную» морозостойкость и ожидаемую эксплуатационную долговечность, а также оценить морозостойкость бетона вибропрессованных изделий, не подвергавшихся эксплуатационным воздействиям;

- результаты производственной апробации предложенных методик, подтверждающие их эффективность.

**Личный вклад соискателя.** Диссертационная работа представляет собой самостоятельный труд соискателя. Автору принадлежат выбор направления и постановка задач исследований, выбор экспериментальных методик и проведение эксперимента, анализ, обобщение и интерпретация полученных результатов исследований. С научным сотрудником Рябчиковым П.В. проведены совместные исследования закономерностей изменения физико-технических свойств бетона под влиянием одновременного воздействия циклического замораживания-оттаивания в растворе соли и механических нагрузок на бетон (мелкозернистый и с крупным заполнителем) для элементов благоустройства.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты диссертации представлены на следующих научных конференциях: XIV международном научно-практическом семинаре (г. Минск, 2006 г.); 5-й Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (г. Минск, 2007 г.); XV Международном научно-методическом семинаре «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь» (г. Новополоцк, 27-28 ноября 2008 г.); XVI Международном научно-практическом семинаре «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь» (г. Брест, 28-30 мая 2009 г.); XVII Международном научно-методическом семинаре «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь» (г. Гродно, 27-28 мая 2010 г.); 8-й Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (г. Минск, 5 мая 2010 г.); Международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (г. Могилев, 22-23 апреля 2010 г.); III Международный симпозиум «Проблемы современного бетона и железобетона» (г. Минск, 9-11 ноября 2011 г.); XIX Международном научно-методическом семинаре «Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров» (г. Брест, 23-25 октября 2014 г.).

**Опубликованность результатов диссертации.** Основные положения диссертационной работы отражены в 16 публикациях, в том числе в 5 статьях в журналах по перечню ВАК, 11 материалах и тезисах докладов научно-технических конференций. Общий объем публикаций составляет 6,2 авторского листа.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка литературных источников и приложений. Ее полный объем составляет 217 страниц, включая: 100 листов машинописного текста, 36 рисунков, 54 таблицы, 4 приложения. Библиографический список включает 154 наименований, из которых 16 – авторские работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первая глава** содержит обзор и анализ литературных данных в области оценки и прогнозирования морозостойкости бетона и его эксплуатационной надежности и долговечности, гипотез и механизма морозной деструкции бетона, взаимосвязи и взаимозависимости устойчивости бетона к переменному замораживанию – оттаиванию с проницаемостью (пористостью) его структуры, влиянию на морозостойкость бетона технологических факторов и дополнительных воздействий эксплуатационной среды в виде солей хлора (используемых в качестве антиобледенителей) и механических нагрузок (статических (сжатие-отпуск) и динамических (ударных, сосредоточенно приложенных), способных спровоцировать трещинообразование и рост проницаемости бетона, что повлияет на его морозостойкость.

На основе анализа результатов исследований Ю.А. Нилендера, Г.И. Горчакова, Г.К. Дементьева, Н.Д. Попова, В.А. Невского, В.М. Москвина, А.М. Подвального, В.В. Стольников, С.В. Шестоперова, А.И. Конопленко, Н.Н. Федякина, А.Е. Шейкина, Ф.М. Иванова, Т. Пауэрса, А. Колинса, Р. Воларе и многих других авторов, публикации которых относятся к периоду 30 – 80-х годов XX века, и современных исследователей этой проблемы в Беларуси – Н.П. Блещика, В.В. Бабицкого, О.В. Лазоренко, С.Н. Ковшара и др., сделан вывод, что анализируемые источники, в целом глубоко и достоверно отражающие явление морозной деструкции бетона, причины и процессы ее развития под влиянием переменного замораживания-оттаивания бетона, ориентированы на оценку и прогнозирование ее величины как исходной характеристики бетона проектного возраста, т.е. с той структурой и прочностными свойствами, которые его характеризуют изначально. При этом не учитывается что бетон элементов тротуарных (дорожных) покрытий (мощения) в процессе эксплуатации постоянно подвергается воздействию механических нагрузок (стирающих; на сжатие – растяжение; ударных и др.), которые способны привести к трещинообразованию в бетоне. В результате будет ускорено развитие всех деструктивных процессов, отраженных в анализируемой литературе: возрастает пористость и количество «свободной» воды в бетоне, усилятся процессы миграции жидкости, роста деформаций (макро- и микроуровня), накопления усталостных деформаций вплоть до трещинообразования в местах «непроявившейся» усадки и пр. Как следствие, показатель морозостойкости, определенный по стандартизированным и приведенным в обзоре литературы методикам, будет значительно превышать фактическую морозостойкость бетона в эксплуатируемых покрытиях, подвергаемых механическим воздействиям. На основании изложенного сформулированы цель и задачи настоящего исследования, заключающиеся в разработке и обосновании методики оперативной оценки фактического состояния и «остаточной» морозостойкости (долговечности) бетона эксплуатируемых покрытий благоустройств (элементов их мощения), с учетом ее снижения во времени под комплексным влиянием эксплуатационной среды и механических нагрузок. Основными практическими результатами исследования явятся возможности оперативного контроля за состоянием эксплуатируемых покрытий, оценки «остаточной» морозостойкости и долговечности их конструктивных элементов, планирования ремонтных мероприятий, а также определение возможности повторного использования изымаемых элементов мощения.

**Во второй главе** отражены результаты исследования закономерностей изменения проницаемости мелкозернистого и содержащего крупный заполнитель вибропрессованного бетона в зависимости от основных технологических факторов: водоцементного отношения, расхода цемента, качества и содержания заполнителей, степени (качества) уплотнения, условий твердения. Результаты экспериментов, частично представленные данными таблицы 1., позволили сформулировать следующие основные выводы.

Таблица 1. – Диапазон характеристик и свойств вибропрессованного бетона установленных в процессе экспериментов, отраженных во второй главе

Материалы: характеристики и диапазон расхода на 1 м <sup>3</sup> бетона				(В/Ц) бетона, д.ед.	Средняя плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие в 28 сут, МПа	Структурные характеристики			
Цемент, кг	Песок (М <sub>к</sub> -2,2...2,7), кг	Щебень (фр.5 – 10мм), кг					Степень гидратации цемента, %	W <sub>н</sub> , %	W, МПа	K <sub>ф</sub> , 10 <sup>-10</sup> см/с
		Традиционный	кубовидный							
450 ... 550	1500 ... 1700	-	-	0,32 ... 0,36	2150 ... 2300	29,5 ... 42,0	61,5 ... 70,0	4,4 ... 9,4	W4 ... W8	4,9 ... 32
400 ... 500	900 ... 1400	400 ... 800	-	0,36 ... 0,39	2300 ... 2400	41,5 ... 52,0	56,0 ... 68,8	3,6 ... 5,6	W4 ... W10	1,0 ... 22
350 ... 450	1050 ... 1450	-	400 ... 800	0,34 ... 0,36	2350 ... 2430	44,0 ... 58,0	- ... -	2,8 ... 4,0	W6 ... ≥W10	0,8 ... 9,0

Примечание. При выполнении экспериментов (здесь и далее) диапазон показателя жесткости бетонных смесей составлял 15...25с; условия твердения образцов – нормально-влажные ( $\varphi \geq 90\%$ ,  $t \sim 20 \pm 3^\circ\text{C}$ ); воздушно-сухие ( $\varphi \approx 60 \pm 10\%$ ;  $t \sim 20 \pm 5^\circ\text{C}$ ); с гидроизоляцией в полиэтиленовой пленке и с «дозреванием» после пропаривания (режим: 2+2 (до  $50^\circ\text{C}$ ) + (5...6 при  $t=50^\circ\text{C}$ ) + (6...10; остывание)) в помещении лаборатории; формирование образцов – вибрирование (A ~ 0,5мм.;  $f \sim 50$  Гц ) с пригрузом до достижения требуемой средней плотности бетона.

Оптимальное значение водоцементного отношения бетона, формируемого вибропрессованием, должно обеспечивать два необходимых условия: объемное прояв-

ление эффекта тиксотропии цементного теста, обеспечивающее формирования слитной структуры цементного камня в бетоне, и, одновременно, условие сохранения формы (геометрических размеров) изделий, приданной в процессе уплотнения бетона. Оптимальное начальное водосодержание может быть определено из выражения:  $(V/C)_{\text{опт}} \sim K_{\text{НГ}} + V_{\text{ад}}^{\text{зап}} / C$ , доли ед., с учетом коэффициента нормальной плотности цемента ( $K_{\text{НГ}}$ , д.ед.), количества адсорбированной заполнителями воды ( $V_{\text{ад}}^{\text{зап}}$ , кг) и расхода цемента ( $C$ , кг).

Недопустимы воздушно-сухие условия твердения, при которых, например, для цементно-песчаного бетона водопоглощение (по массе) – увеличивается на 30...40%; количество химически связанной воды снижается на 10...15%; водонепроницаемость снижается в 1,5...2 раза; коэффициент фильтрации возрастает в 3...5 раз, в сравнении с «дозреванием» бетона после пропаривания (либо с твердением при гидроизоляции полиэтиленовой пленкой и в нормально-влажностных условиях).

Введение в мелкозернистый бетон гранитного щебня (фр. до 10 мм) в рациональном для вибропрессования объеме ( $\sim 0,22...0,30\text{м}^3$  или  $\sim 600...800\text{кг}$  на  $1\text{м}^3$  бетона) способствует повышению плотности укладки формируемого бетона при одновременном снижении на 10...15% расхода цемента. Так, в сравнении образцов (нормально-влажностное твердение) цементно-песчаного бетона ( $C \sim 500\text{кг}$ ), бетона с традиционным щебнем ( $C \sim 450\text{кг}$ ) и с кубовидным щебнем ( $C \sim 400\text{кг}$ ), при прочих равных условиях, структурные показатели характеризовались:  $\rho_{\sigma} \sim 2250\text{ кг/м}^3$ ;  $2350\text{ кг/м}^3$  и  $2400\text{ кг/м}^3$ ;  $W_m \sim 5,5\%$ ;  $4,3\%$  и  $3,6\%$ ;  $W \sim 8; 10$  и  $\geq 10\text{ МПа}$ ;  $K_{\phi} \sim \sim 5,3 \times 10^{-10}\text{ см/с}$ ;  $1,0 \times 10^{-10}\text{ см/с}$  и  $0,8 \times 10^{-10}\text{ см/с}$  соответственно.

Снижение водоцементного отношения и проницаемости бетона за счет увеличения содержания цемента сверх оптимального количества, не рационально, т.к. увеличение расхода цемента на 10...20% сопровождалось снижением водопоглощения цементно-песчаного бетона всего на  $\sim 0,7\%$ ; а с традиционным щебнем на  $\sim 0,4...0,5\%$ , и с кубовидным:  $\sim 0,2...0,3\%$ , поскольку влекло за собой рост объема цементного камня в бетоне, являющегося наиболее пористой его составляющей.

По результатам экспериментов 2-ой главы выявлена прямая взаимосвязь между скоростью ультразвука в вибропрессованном бетоне и количеством «поглощаемой» его порами воды, что позволило установить соответствующую корреляционную зависимость между скоростью распространения ультразвукового импульса и «водосодержанием» (влажностью) бетона. При этом выявлено, что скорость ультразвука в вибропрессованном бетоне естественной влажности практически не изменяется после 7 суток твердения к более позднему возрасту (в экспериментах до 90 сут) и увеличивается в зависимости от степени его увлажнения. По этим результатам, путем экспериментальной оценки изменений влажности (дизелькометрический метод оперативного контроля), а также прочности бетона на сжатие (с предварительным определением скорости ультразвука на тех же образцах) установили закономерности их взаимосвязи, которая является необходимой предпосылкой для разработки методики оценки морозостойкости бетона в эксплуатируемых элементах покрытия (мошания).



**В третьей главе** с этой целью решали задачу по установлению закономерностей взаимосвязи между деструкцией бетона, подвергаемого многократному воздействию статической (таблица 2) или динамической (ударной) нагрузок (таблица 3), которая проявляется в изменениях его прочности, модуля упругости, проницаемости (водопоглощения), истираемости, и фиксацией этого процесса в сопутствующих изменениях скорости ультразвука.

Статическую механическую нагрузку на образцы бетона (таблица 2) имитировали многократным загрузением под прессом с усилием, примерно, до 30; 50; 70 и 90% от прочности бетона в проектном (28 сут.) возрасте, динамическую (ударную, сосредоточенную) механическую нагрузку (таблица 3) имитировали 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 граней (верхней или боковой при по следующем сжатии) образцов. 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 «базового» размера 150x150x150 мм. Во всех случаях образцы испытывали по достижении проектного возраста (28 сут.) после изготовления.

По результатам экспериментальных исследований, частично представленных данными таблиц 2 и 3, установлено, что циклически действующая статическая нагрузка до уровня ~40 % от прочности бетона на сжатие практически не вызывает ухудшения его качества длительный период. С ее ростом сверх 50%-ного уровня развитие процесса трещинообразования активизируется, а превышение 70 %-го уровня прочности бетона отражается в установленном экспериментально росте его водопоглощения (на  $\geq 40\%$ ), снижении прочности (на  $\geq 25\%$ ), модуля упругости, износоустойчивости в ~2 раза и, следует ожидать, его морозостойкости и долговечности.

Установлено, что наибольший отрицательный эффект от динамической (сосредоточенной ударной) нагрузки (таблица 3) наблюдается тогда, когда направление ее действия на бетон совпадает с направлением действия нагрузки при последующем сжатии, как это имеет место при эксплуатации покрытий. Очевидно, что в этом случае образующиеся в бетоне под ударной нагрузкой микротрещины инициируют образование и развитие таковых при последующем сжатии образцов, что приводит к снижению его прочности. Одновременно экспериментально установлено, что изменения величины (снижение) скорости ультразвука фиксируются раньше, чем наступает снижение прочности бетона, подверженного воздействию циклических нагрузок. Это позволяет использовать ультразвуковые приборы для раннего обнаружения деструктивных процессов в эксплуатируемых бетонных элементах мощения.

**Четвертая глава** отражает процесс и результаты экспериментальных исследований (рисунок 1) зависимости показателя морозостойкости бетона в водной среде и солевом растворе без дополнительного механического воздействия на

Таблица 2. – Влияние статической нагрузки на характеристики бетона при циклических испытаниях

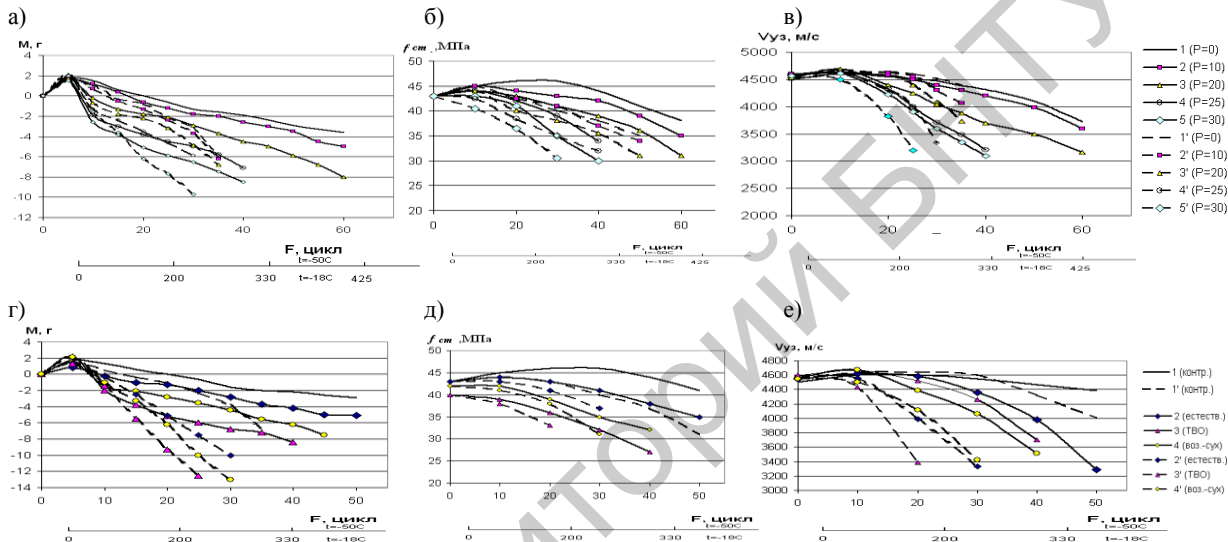
Уровень статической нагрузки, % от $f_{cm,28}$	Характеристики бетона после числа циклов «сжатие-отпуск», цикл:														Прочность бетона и скорость ультразвука по последнему значению, % от начального
	0*	1	2	3	4	5	10	20	30	40	50	60	70		
а) Прочность бетона на сжатие, МПа:															
30	45**	-	-	-	-	45	46	45	44	44	43	43	42	93	
	53***	-	-	-	-	53	53	54	52	52	53	52	51	96	
50	45	-	-	-	-	45	45	43	43	43	40	37	35	78	
	53	-	-	-	-	53	53	52	51	50	49	47	45	85	
50****	43	-	-	-	-	43	42	40	38	37	35	33	-	77	
	52	-	-	-	-	52	52	50	48	47	45	43	41	79	
70	45	-	-	-	-	45	45	42	39	36	-	-	-	80	
	53	-	-	-	-	53	53	51	49	45	40	-	-	75	
70****	43	-	-	-	-	43	41	37	33	-	-	-	-	77	
	52	-	-	-	-	52	51	48	44	39	-	-	-	75	
90	45	44	42	40	38	35	-	-	-	-	-	-	-	78	
	53	52	50	48	45	42	-	-	-	-	-	-	-	80	
б) Скорость ультразвука, м/с:															
30	4360**	-	-	-	-	4350	4310	4300	4300	4240	4160	4040	3880	89	
	4520***	-	-	-	-	4520	4500	4500	4500	4440	4380	4350	4330	96	
50	4360	-	-	-	-	4350	4350	4180	4060	3890	3660	3290	2800	64	
	4520	-	-	-	-	4520	4500	4330	4210	4130	3950	3660	3270	72	
70	4360	-	-	-	-	4270	3820	3300	2970	2780	-	-	-	64	
	4520	-	-	-	-	4480	4360	4100	3910	3270	-	-	-	72	
90	4360	-	-	3390	-	2100	-	-	-	-	-	-	-	48	
	4520	-	-	3640	-	2380	-	-	-	-	-	-	-	53	

0\* – в возрасте 28 суток; \*\* образцы мелкозернистого бетона; \*\*\* образцы бетона со щебнем; \*\*\*\*- в водонасыщенном состоянии.

Таблица 3. – Изменение прочности на сжатие и водопоглощения по массе бетона под воздействием динамической (ударной) нагрузки

Условия твердения бетона	Вид бетона	Значения характеристики бетона, после количества ударов:							Прочность бетона (прирост водопоглощения) по последнему значению, % от начального.
		0 28сут	25	50	75	100	125	150	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>А) Прочность бетона на сжатие, МПа</b>									
Естественные (в пленке)	мелкозернистый	45*	45	44	43	41	39	34	75
		43**	41	37	32	-	-	-	74
		45***	45	44	43	43	42	41	91
Естественные (в пленке)	со щебнем	53*	53	52	52	50	48	44	83
		51**	50	47	43	39	-	-	76
		53***	53	53	52	52	51	50	94
Воздушно-сухие	мелкозернистый	41*	40	40	38	36	32	28	70
		39**	36	30	-	-	-	-	77
	со щебнем	48*	48	46	44	43	41	38	80
		46**	44	41	37	-	-	-	80
Пропаривание с дозреванием	мелкозернистый	43*	42	42	40	38	36	31	73
		41**	39	34	29	-	-	-	70
	со щебнем	51*	51	50	48	48	46	42	82
		50**	48	45	41	36	-	-	72
<b>Б) Водопоглощение бетона по массе</b>									
Естественные (в пленке)	мелкозернистый	4,0	-	4,3	-	4,8	-	5,6	40
	со щебнем	3,1	-	3,3	-	3,5	-	3,8	23
Воздушно-сухие	мелкозернистый	5,5	-	5,9	-	6,9	-	8,1	47
Воздушно-сухие	со щебнем	4,4	-	4,6	-	4,9	-	5,6	27
Пропаривание с дозреванием	мелкозернистый	4,6	-	4,9	-	5,2	-	6,2	35
	со щебнем	3,8	-	4,0	-	4,3	-	4,7	24

\*Направление ударов совпадает с направлением действия нагрузки при последующем сжатии; \*\* в водонасыщенном состоянии; \*\*\* направление ударов – по боковой грани (т.е. перпендикулярно направлению действия нагрузки при последующем сжатии).



сплошные линии №1-5 для «воды-среды»; пунктирные линии №1'-5' для 5% р-ра NaCl; 1-1' – контрольные образцы (без динамической нагрузки), 2-2' - твердые с гидроизоляцией поверхности (под пленкой), 3-3' - пропаренные с дальнейшим хранением на воздухе, 4-4' – твердые в воздушно-сухих условиях

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

**Тенденции изменения массы (г), прочности (д) и скорости ультразвука (е) 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.**

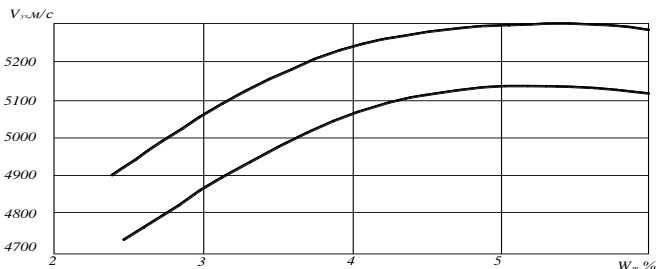
образцы испытываемого бетона (мелкозернистого и с крупным заполнителем) и при воздействии статической или динамической нагрузок.

В результате установлена взаимосвязь между накапливающимися изменениями в структуре бетона и отражающим эти изменения фактором – скоростью ультразвука, путем имитации механических эксплуатационных воздействий в процессе испытаний образцов на морозостойкость. Накопление данных осуществляли поэтапно. Вначале образцы бетона подвергали испытаниям на морозостойкость (без и с приложением механических нагрузок) в водной среде; на второй стадии испытаний – с использованием 5%-го раствора NaCl. В обоих случаях в процессе испытаний на морозостойкость (при температуре: - (50...55) °С) отслеживали изменения массы, прочности бетона и соответствующие изменения скорости ультразвука, отражающие структурные изменения в испытываемых образцах бетона, что частично представлено графическими зависимостями на рисунке 1., (а – е).

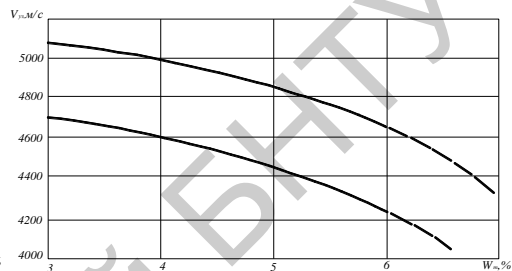
При этом выявлено, что статическая нагрузка, достигающая не менее 60...70 % от проектной, и, особенно, динамическая (ударная, сосредоточенно приложенная) при циклическом замораживании-оттаивании приводят к ускоренному разрушению бетона и снижению его износоустойчивости. Одновременно было установлено, что морозостойкость образцов вибропрессованного бетона, полученных разрезкой тротуарных плит, резко снижается относительно как специально изготовленных в формах образцов-кубов, так и натуральных образцов-плит. Разница в показателях морозостойкости бетона настолько значительна, что это потребовало внесения изменений в СТБ 1152-99 в части недопустимости изготовления образцов для испытаний на морозостойкость резкой готовых изделий, которые были приняты Госстандартом Республики Беларусь (см. данные о внедрении).

По результатам выполненных исследований определено, что используя значения скорости ультразвука, изменяющейся в процессе испытаний образцов бетона на морозостойкость (как в среде-воде, так и солевом растворе (в последнем случае указанные далее периоды короче по времени)), возможно выделить три стадии структурно-прочностных изменений в вибропрессованном бетоне испытываемых образцов или элементах эксплуатируемых покрытий. Первая стадия – это период уплотнения его структуры, отражающийся в росте прочности и скорости ультразвука; вторая – стабилизация структуры при примерном постоянстве прочности и скорости ультразвука и третья – начало и развитие деструкции бетона, отражаемой снижением скорости ультразвука и прочности. Выявленные закономерности позволили разработать графические зависимости, представленные для примера рисунком 2. и являющиеся неотъемлемой частью предлагаемой методики.

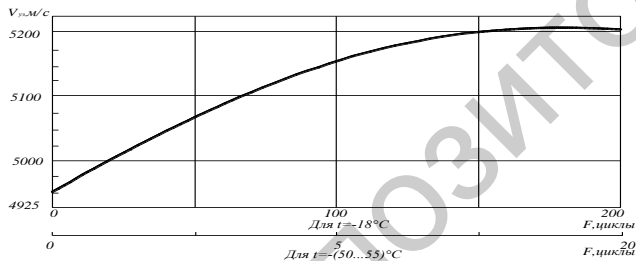
Обобщение в **пятой главе** накопленных экспериментальных данных, позволило предложить: методику ускоренной (за пять суток) оценки морозостойкости вибропрессованного бетона в изделиях без осуществления циклических испытаний, а также методику оценки фактического состояния вибропрессованного бетона элементов благоустройства (мошения) в процессе эксплуатации покрытий (рисунок 2), на основании установленного по разработанной методике количества циклов «замораживания-оттаивания», которые «прошел» (накопил) бетон к моменту его оценки в привязке к стандартизированным циклическим испытаниям на морозостойкость и предлагаемым расчетным «приведенным» циклам (таблица 4.). В обоих случаях оценка осуществляется по фактическим величинам влажности и



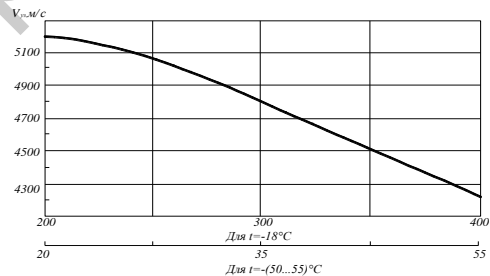
а) область установленных значений скорости ультразвука ( $V_{уз}$  м/с) вибропрессованного мелкозернистого бетона в зависимости от влажности ( $W_m$ , %) на стадиях I и II.



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



в) зависимость «скорость ультразвука - морозостойкость» (циклы) для вибропрессованного мелкозернистого бетона на стадиях I и II.



г) зависимость «скорость ультразвука - морозостойкость» (циклы) для вибропрессованного мелкозернистого бетона на стадии III

Рисунок 2. - Графические зависимости для оценки морозостойкости мелкозернистого вибропрессованного бетона

скорости ультразвука в испытуемом бетоне. Величина последней сопоставляется с экспериментально установленным в настоящем диссертационном исследовании диапазоном ее значений, выявленным в процессе стандартных испытаний на морозостойкость образцов мелкозернистого (цементно-песчаного; рис. 2 а) или б), либо бетона с крупным заполнителем (графические закономерности приведены в диссертации) и отражающим структурные (прочностные) изменения в бетоне на разных стадиях: упрочнения структуры, ее стабильности и разуплотнения структуры (деструкции). По полученному среднему значению  $V_{уз,i}$  определяют количество стандартных циклов испытаний  $N_{факт,i}$ , которые прошел (накопил) бетон (рис. 2 в) или г)) и «остаточную» морозостойкость бетона из зависимости:  $F_{осми} = 250 - N_{фактi}$ , циклов.

Таблица 4. – Расчетное количество среднегодовых «приведенных» циклов

Состояние структуры бетона, установленное в процессе оценки	Расчетное количество $N_{пр}^{год}$ , цикл/год, в зависимости от условий эксплуатации покрытий: уровня и вида механических нагрузок			
	отсутствует или статическая, статическая, менее 40 %	статическая, (40...50) %	статическая, (51...60) %	статическая, > 60 % и динамическая
Стадия I (упрочнение и стабильность - начальная фаза)	12,5	13,5	14,5	17,5
Стадия II (стабильность - завершающая фаза)	13,5	15,0	16,5	20,0
Стадия III (разуплотнение)	20,0	21,0	22,5	25,0

Примечания. 1. Статическая нагрузка, включая нагрузку от "резино-колесной" техники. 2. Динамическая, включая ударную и сосредоточенно-приложенную нагрузку от жестких опорных элементов колесной техники. 3. Завершающая фаза стабильного состояния бетона соответствует значениям скорости ультразвука после максимума графических зависимостей, установленных и приведенных в диссертации.

Ожидаемую долговечность оцениваемого бетона (изделий – элементов мощения) рассчитывают по зависимости:  $D_i \sim F_{осми} / N_{пр}^{год}$ , год. Ее расчет (в годах) предложено осуществлять по «приведенным» циклам таблицы 4, учитывающим отличия (по глубине, времени замораживания-оттаивания) циклического воздействия на бетон в процессе эксплуатации покрытий от стандартизированных испытаний бетона на морозостойкость, с учетом среднегодовых данных о количестве таких циклов за холодный период года в климатической зоне эксплуатации покрытия и влияния механических нагрузок на бетон. При разработке методики и данных таблицы 4 учтено, что, например, для г. Минска (за период 2000...2013 гг.) количество переходов температуры через отметку «0 С» составило, в среднем более 100,

т.е. приблизительно 50 естественных циклов за год. Подробно методика и пример пользования ей приведены в диссертации.

*Методика ускоренной оценки* морозостойкости бетона изделий, изготовленных вибропрессованием и не подвергавшихся эксплуатационным воздействиям, предназначена для оценки этого показателя в оперативном порядке предприятиями-изготовителями элементов благоустройства (мощения). По результатам такой оценки (включая контроль прочности, водопоглощения бетона) технологические службы, при необходимости, корректируют параметры производственного технологического процесса (рецептуру бетона, параметры формования, твердения изделий). Подробно методика и пример пользования ей приведены в диссертации.

Результаты исследований внедрены в производственный процесс в форме обследований различных зон благоустройств г. Минска, по данным которых СП «Техинмаш» ООО принимало решения о ремонтах и замене покрытий и дальнейшем повторном использовании тротуарных плит. Внесено изменение в стандарт Беларуси: СТБ 1152 – 99 «Плиты тротуарные и камни бортовые бетонные вибропрессованные. Методы определения прочности и морозостойкости», в части правил изготовления образцов вибропрессованного бетона для испытаний на морозостойкость. В производственных условиях ОАО «Завод СЖБ-Борисов» г. Борисова, Минской области и ОАО «Минскжелезобетон» г. Минска апробирована ускоренная методика контроля морозостойкости бетона, что способствовало повышению качества выпускаемой продукции. Соответствующие акты и справки приведены в диссертации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### **Основные научные результаты диссертации.**

На основании анализа и обобщения теоретических и экспериментальных данных, полученных в результате диссертационного исследования и его производственной апробации, можно сделать следующие выводы.

1 Разработана, экспериментально обоснована и апробирована методика оперативной оценки фактического состояния вибропрессованного бетона в процессе эксплуатации изготовленных из него элементов благоустройства (тротуарных и иных плит, бортовых и иных камней) и их ожидаемой (остаточной) морозостойкости, а также долговечности устроенных из них покрытий с учетом комплексных физико-механических воздействий на бетон, что позволяет осуществлять плановое или контрольное наблюдение за состоянием таких покрытий с использованием методов неразрушающего контроля (для определения влажности бетона и скорости ультразвука в нем), заблаговременно планировать ремонтные мероприятия или их замену, а также позволяет оценить возможность повторного использования изымаемых из покрытий элементов мощения и ожидаемый срок их дальнейшей эксплуатации [1, 2, 3, 4, 7].

2 Разработана, экспериментально обоснована и апробирована методика ускоренной оценки морозостойкости бетона вибропрессованных изделий – элементов благоустройства (мощения), не подвергавшихся эксплуатации, позволяющая произвести оценочные испытания бетона в течение пяти дней с использованием методов неразрушающего контроля влажности и скорости ультразвука (без проведения циклических испытаний) и определить данный показатель, а на этом основа-



нии вносить (при необходимости) корректировки в технологический процесс изготовления изделий с целью обеспечения требуемой морозостойкости бетона и качества продукции [3, 5, 6, 8, 14, 15, 16].

3 Получены новые результаты комплексных экспериментальных исследований, выявившие закономерности «накопления» изменений в структуре (пористости) вибропрессованного бетона под влиянием циклического воздействия замораживания-оттаивания в водной среде или растворе NaCl при одновременном дополнительном воздействии статической или динамической (ударной, сосредоточенно приложенной) нагрузки, что позволило установить возрастающее деструктивное влияние статической нагрузки, превышающей уровень в 50% от его проектной прочности, резко нарастающее при ее увеличении не менее 70% от проектной, и, особенно, под действием ударной сосредоточенно приложенной динамической нагрузки, в итоге приводящих к снижению устойчивости бетона при циклических воздействиях как испытательной, так и эксплуатационной среды, снижению его эксплуатационной надежности и долговечности в 2...3 и более раза [2, 3, 6, 9, 10, 11, 12, 14].

4 Получены новые результаты экспериментальных исследований, выявившие закономерности изменения скорости распространения ультразвукового импульса в бетоне, подверженном комплексному воздействию размораживания и механических нагрузок, которые подтверждают взаимосвязь этих изменений с нижней (не менее 40% проектной прочности бетона на сжатие) и верхней (не менее 70% проектной прочности бетона) границами трещинообразования и адекватно отражают соответствующие изменения в состоянии структуры (пористости) бетона. Данные закономерности позволили разработать графические зависимости для оценки фактического состояния бетона в процессе его эксплуатации и количественно (по установленным значениям влажности и скорости ультразвука) оценить степень морозной деструкции испытываемого (или - эксплуатируемого) бетона. На этом основании (по разработанной методике) рассчитать его «остаточную» морозостойкость и ожидаемую эксплуатационную долговечность, а также определить возможность повторного использования изымаемых при ремонтах (заменах) элементов мощения и ожидаемый период их эксплуатации [2, 3, 5, 9, 10, 11, 12, 13].

5 Получили развитие представления о влиянии технологических факторов: состава бетона, свойств материалов, степени уплотнения и условий твердения, на структурные и прочностные характеристики вибропрессованного бетона, что позволяет определять рациональное сочетание их с целью обеспечения требуемой морозостойкости элементов благоустройства, изготавливаемых способом вибропрессования; выявленные при этом закономерности изменения скорости ультразвука в процессе испытаний бетона на морозостойкость позволили предложить и обосновать ускоренную методику ее оценки в вибропрессованных изделиях, не подвергавшихся эксплуатационным воздействиям. В совокупности это развивает и дополняет теоретические и эмпирические положения о морозной деструкции конструкционного тяжелого бетона, методах и приемах ее оценки [1, 5, 6, 8, 15].

### Рекомендации по практическому использованию результатов

Теоретические и экспериментально-практические результаты диссертационно-исследования рекомендуется использовать:

- методику оперативной оценки состояния бетона эксплуатируемых покрытий для текущего контроля (мониторинга) за их состоянием, планирования ремонтных работ, последующего вторичного использования изымаемых элементов мощения, с целью поддержания эксплуатационной надежности, качества внешнего вида благоустройств (трогуаров, площадей и т.п.), снижения затрат на их содержание, в том числе, с учетом возможности повторного использования изымаемых элементов мощения;

- методику ускоренной оценки морозостойкости бетона вибропрессованных изделий – для оперативного контроля за этим показателем выпускаемой продукции и корректировки параметров технологического процесса с целью обеспечения требуемой морозостойкости бетона и качества продукции;

- установленные закономерности снижения прочности, морозостойкости и долговечности вибропрессованного бетона (изделий) под комплексным воздействием эксплуатационной среды и механических нагрузок для назначения уровня прочности бетона при проектировании покрытий с учетом ожидаемых условий эксплуатации, а также эксплуатационными службами (организациями) для планирования ремонтных работ при содержании покрытий из элементов мощения;

- при определении возможности повторного использования вибропрессованных изделий и их ожидаемой долговечности для последующей эксплуатации.

Результаты производственной апробации данных диссертационного исследования подтвердили их эффективность путем применения разработанных методик при оценке фактического состояния бетона в процессе эксплуатации покрытий (внедрено на СП «Техинмаш» ООО г. Минска) и ускоренной оценке морозостойкости бетона свежизготовленных вибропрессованных изделий (внедрено на ОАО «Завод СЖБ-Борисов» г. Борисова, Минской области и ОАО «Минскжелезобетон» г. Минска), а также путем внесения изменений в СТБ 1152 – 99.

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

#### Статьи в научных журналах

1. 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. 18-29.

2. 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.

3. Батяновский Э.И. Морозо- и солестойкость бетона, подверженного механическим нагрузкам / Э.И. Батяновский, А.И. Бондарович// Вестник БНТУ. – 2008. – № 4. – С. 5-16.

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

5. Бондарович, А.И. Методика ускоренной оценки морозостойкости вибро-прессованного бетона в изделиях / А.И. Бондарович, Э.И. Батыновский // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. трудов / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. РУП «Институт БелНИИС»; редкол. М.Ф. Марковский (председатель) [и др.]. – Минск: издатель А.Н. Вараксин. – 2014 – № 6. – Стр. 34-44.

#### **Статьи и тезисы в материалах конференций**

6. Бондарович, А.И. О влиянии механических нагрузок на эксплуатационные свойства бетона / А.И. Бондарович, П.В. Рябчиков, Э.И. Батыновский, Н.М. Голубев// Сборник статей XIV международного научно-практического семинара в 2-х томах. БНТУ Минск. – 2006 г. Стр.184-192.

7. Батыновский Э.И. Морозо- и солестойкость бетона, подверженного механическим нагрузкам / Э.И. Батыновский, А.И. Бондарович// Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2008. – № 11-118. – С. 63.

8. Бондарович, А.И. Основные положения методики оценки «остаточной» морозостойкости и долговечности бетона элементов благоустройства / А.И. Бондарович, Э.И. Батыновский // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров РБ: материалы междунар. Научно-методического семинара (Новополоцк, 27-28 ноября 2008г.): сб. тр.XV Междунар. науч.-метод. семинара: в 2 т./ Под общ. ред. Д.Н. Лазовского, А.А. Бакатовича. – Новополоцк: ПГУ. – 2008.Т. 2, – С. 50-54.

9. Бондарович, А.И. Стойкость бетона при комплексном воздействии агрессивной среды и механических нагрузок / А.И. Бондарович, Э.И. Батыновский // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров РБ: материалы междунар. Научно-методического семинара (Брест, 28-30 мая 2009г.): сб. тр.XVI Междунар. науч.-метод. семинара: в 2 ч./ Под общ. ред. П.С. Пойты, В.В. Тура. – Брест: БрГУ. – 2009.Ч. 2, – С. 29-33.

10. Батыновский, Э.И. Долговечность бетона при комплексном агрессивном воздействии Долговечность бетона при комплексном агрессивном воздействии / Э.И. Батыновский, А.И. Бондарович, Н.М. Голубев // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров РБ: сб. науч. статей. – Гродно: ГрГУ. – 2010. – С. 273-278.

11. Бондарович А.И. Влияние циклических нагрузок на величину динамического модуля упругости вибропрессованного и вибролитьевого бетона / А.И. Бондарович, Э.И. Батыновский, И.Ф. Цывилько // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч. техн. конф., Могилев, 22-23 апреля 2010 г.: в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федеральное агенство по образованию, Могилев. обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Респ. Беларусь, Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. : И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т. – 2010. – Ч. 2. – С. 146-148.

12. Батыновский Э.И. Прочность и упруго-деформативные характеристики вибро-прессованного бетона в зависимости от многократного приложения нагрузок. / Э.И. Батыновский, А.И. Бондарович// Проблемы современного бетона и железобетона: Материалы III Международного симпозиума: в 2 т./Под общ. Ред. М.Ф. Марковского – Минск. – 2011, Т. 1, – Стр. 56-65.

13. Бондарович, А.И. Влияние циклических воздействий на кинетику изменения структурно-механических и упруго-деформационных характеристик бетона / А.И. Бондарович, С.Н. Ковшар // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: материалы. XVIII Междунар. науч.-метод. семинара: в 2 т., Новополоцк, 28-29 ноября 2012 г./ под общ. ред. Д.Н. Лазовского, А.А. Бакатовича. – Новополоцк: ПГУ, 2012. Т. II, – С. 134-139.

14. Бондарович, А.И. Прочность и упруго-деформативные характеристики вибропрессованного бетона в зависимости от многократного приложения нагрузок. / А.И. Бондарович, Р.С. Александров // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства: материалы научно-методического семинара: Минск, 29 мая 2012 г. / БНТУ, 2012 – ч. 2, – Стр.19-30.

15. Бондарович, А.И. Влияние комплексного воздействия эксплуатационной среды и механических нагрузок на динамику изменения свойств бетона элементов благоустройства / А.И. Бондарович, Э.И. Батяновский // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов европейского союза в области строительства: материалы научно-методического семинара: Минск, 22-23 мая 2013 г. / БНТУ, 2013 г. ч. 2., Стр.28-39.

16. Бондарович, А.И. Методика ускоренной оценки морозостойкости вибропрессованного бетона в изделиях / А.И. Бондарович, Э.И. Батяновский // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров РБ: материалы XIX Междунар. научно-методического семинара: Брест, 23-25 октября 2014 г. / : в 2 ч./ под общ. ред. С.М. Семенюка. – Брест: БрГУ, 2014.ч. 2, – С. 3-9.

## РЕЗЮМЭ

Бандаровіч Аляксандр Іванавіч

### Уплыў комплексных фізіка-механічных уздзеянняў на структуру і марозаўстойлівасць вібрапрасаванага цяжкага бетону

**Ключавыя словы:** вібрапрасаваны бетон; дробназярністы бетон; бетон з буйным запаўняльнікам; марозаўстойлівасць; даўгавечнасць; статычная нагрузка; дынамічная (ударная) нагрузка; методдыка.

**Мэта працы** – выяўленне заканамернасцей структурных змяненняў і распрацоўка методдыкі аператыўнай адзнакі марозаўстойлівасці вібрапрасаванага бетону вырабаў парадкаўладкавання і чакаемай даўгавечнасці выкананых з іх і эксплуатаемых пакрыццяў, з улікам комплексных фізіка-механічных уздзеянняў на бетон.

У выніку тэарэтычных і эксперыментальных даследаванняў распрацавана методдыка аператыўнай адзнакі фактычнага стану вібрапрасаваных вырабаў пакрыццяў парадкаўладкавання (машчэння) у часе іх эксплуатацыі, якая дазваляе ўстанавіць лік пройдзеных (на момант адзнакі) бетонам цыклаў замарожвання-адтайвання і чакаемы лік іх, які можа вытрымаць бетон на працягу эксплуатацыі ў гэтых умовах, і на гэтай выснове разлічыць час іх наступнай эксплуатацыі ці – даўгавечнасць, з улікам дадатковых уздзеянняў механічных нагрузак на бетон эксплуатаемых пакрыццяў.

На выснове вынікаў эксперыментальных даследаванняў распрацавана методдыка паскораннай адзнакі марозаўстойлівасці бетону без выканання цыклічных іспытаў, дазваляючая на працягу пяці дзён адзначыць гэты паказчык, што забяспечвае ўмовы для аператыўнага кантролю і, пры неабходнасці, каррэктывыя параметры тэхналагічнага працэсу прыгатавання вырабаў (саставу бетону, ступені (якасці) ущільнення, рэжымаў цвярдзення) з мэтай забеспячэння неабходнай якасці прадукцыі.

Устаноўлены заканамернасці змяненняў у структуры вібрапрасаванага бетону пад сумесным уздзеяннем цыклічнага замарожвання-адтайвання і механічных нагрузак (статычнай: уціск-адпушчэнне і дынамічнай: ударнай, згрупавана прыложанай), якія фіксуюцца і адлюстроўваюцца ў зменах хуткасці руху ўльтрагукавага імпульсу, што з’явілася высновай прапанаваных методдык.

Зроблена вытворчая апрабачыя вынікаў дысертацыйнага даследавання, якая пацвердзіла іх эфектыўнасць, у тым ліку ўключаючы змяненне ў нарматыўным дакуменце Беларусі (СТБ 1152–99) па кантролю марозаўстойлівасці вібрапрасаванага бетону.

## РЕЗЮМЕ

Бондарович Александр Иванович

### Влияние комплексных физико-механических воздействий на структуру и морозостойкость вибропрессованного тяжелого бетона

**Ключевые слова:** вибропрессованный бетон; мелкозернистый бетон; бетон с крупным заполнителем; морозостойкость; прочность; долговечность; статическая нагрузка; динамическая (ударная) нагрузка; методика.

**Цель работы** – выявление закономерностей структурных изменений и разработка методики оперативной оценки морозостойкости вибропрессованного бетона элементов благоустройства и ожидаемой долговечности устроенных из них и эксплуатируемых покрытий, с учетом комплексных физико-механических воздействий на бетон.

В результате теоретических и экспериментальных исследований разработана методика оперативной оценки фактического состояния вибропрессованных элементов (изделий) покрытий благоустройства (мощения) в процессе их эксплуатации, позволяющая определить количество пройденных (на момент оценки) бетоном циклов замораживания-оттаивания и ожидаемое их количество, которое может выдержать бетон при дальнейшей эксплуатации в данных условиях, и на этом основании рассчитать срок их дальнейшей эксплуатации, т.е. – долговечность, с учетом дополнительного воздействия механических нагрузок на бетон эксплуатируемого покрытия.

На основании результатов экспериментальных исследований разработана и предложена методика ускоренной оценки морозостойкости бетона без проведения циклических испытаний, позволяющая в течение пяти дней оценить этот показатель, что обеспечивает условия для оперативного контроля и, при необходимости, корректировки параметров технологического процесса изготовления изделий (состава бетона, степени (качества) уплотнения, режимов твердения) с целью обеспечения требуемого качества продукции.

Установлены закономерности изменений в структуре вибропрессованного бетона под комплексным действием циклического замораживания-оттаивания и механических нагрузок (статической: сжатие-отпуск, и динамической: ударной, сосредоточенно приложенной), которые фиксируются и отражаются соответствующими изменениями скорости прохождения ультразвукового импульса, что составило основу предложенных методик.

Выполнена производственная апробация результатов диссертационного исследования, подтвердившая их эффективность, в том числе включая изменения в нормативном документе Беларуси (СТБ 1152–99) по контролю морозостойкости вибропрессованного бетона.

## SUMMARY

Bandarovich Aliaksandr Ivanovich

### **The influence of complex physical and mechanical effects on the structure and durability of heavy concrete**

**The key words are** vibrocompressed concrete, fine-grained concrete, concrete with large aggregate, frost resistance, toughness, durability, static load, dynamic (striking) load, methods.

**The purpose of the work is** identification of patterns of structural change the development of the methods for rapid assessment of frost resistance of vibrocompressed concrete elements of improvement and probable longevity made of them and exploited covering, with the account of the complex physical and mechanical influence on the concrete.

As a result of theoretical and experimental studies the methods of the operative estimation of the actual condition of vibrocompressed elements (the products) covering improvement (the pavings) in the process of their usages were designed. These methods allow to determine the number of the passed (at the time of evaluation) concrete freeze-thaw cycles and the possible amount of the loads, which the concrete can bear under the further usage in these conditions, and on this base can calculate the expected period to their usages (the longevity) with the account of the additional influence of the mechanical loads on the concrete of the exploited covering.

Based on the results of experimental studies, the methods of rapid assessment of frost resistance of the concrete without cyclic tests were worked out and offered, allowing to evaluate this indicator for five days, which provides some conditions for the operational control and if necessary, the adjusting of the parameters of the process of manufacturing products (the composition of the concrete, the degree (the quality) of the compaction, the mode of the repeating over and over again) to ensure the required quality of products.

We have installed the regularities of the relationship and interdependence of states and changes in the structure of the vibrated concrete under the complex actions of cyclic freezing and thawing and mechanical loads (steady-state, compression-furlough and dynamic; striking, concentrated attached) which are recorded and reflected by the changes of the speed of the ultrasonic pulses. These laws established for the fine-grained (cement-sand) concrete and the concrete containing the coarse aggregate formed the basis of the proposed methods.

The industrial testing of the results of our dissertation research was made. It confirmed their efficiency, including the changes at the normative document of the Republic of Belarus (STB 1152-99) about the control of the frost resistance of the vibrocompressed concrete.

Научное издание

**БОНДАРОВИЧ** Александр Иванович

**ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ  
ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СТРУКТУРУ И МОРОЗОСТОЙКОСТЬ  
ВИБРОПРЕССОВАННОГО ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

Подписано в печать **05.02.2014**. формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 1,28. Уч. –изд. л. 1.00. Тираж 70. Заказ 376.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий №1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск