

УДК 666.972

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА ПО КРИТЕРИЮ «ОСТАТОЧНОЙ» МОРОЗОСТОЙКОСТИ

*ASSESSMENT OF HEAVY CONCRETE DURABILITY
BY RESIDUAL FROST RESISTANCE CRITERION*

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. Оценка фактического состояния бетона и его вероятной долговечности на перспективу в эксплуатируемых покрытиях представляет собой сложную для решения инженерную задачу. В статье изложены основные положения предлагаемой методики оценки фактического состояния бетона и расчета его вероятной долговечности по критерию «остаточной» морозостойкости. Она базируется на результатах экспериментального исследования тенденций изменения (ухудшения) прочностных и эксплуатационных характеристик (морозо- и солестойкости) тяжелого бетона при комплексном воздействии агрессивной эксплуатационной среды и механических нагрузок.

Durability of concrete used as road and sidewalk cover and similar elements of transport communications cover and provision of amenities is basically assessed by frost resistance and durability indexes. During service life coatings concrete is exposed by combined physical and chemical influences of aggressive operation environment in combination with intense mechanical loads that exert significant influence on the change of its structural characteristics in time, and can reduce operation reliability and durability. Assessment of the actual state of concrete and its possible durability in future is a complicated engineering task. The article outlines principal provisions of proposed technique of actual concrete state assessment and estimation of its possible

Э.И. Батяновский,

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология бетона и строительные материалы» Белорусского национального технического университета, г. Минск, Беларусь

А.И. Бондарович,

научный сотрудник НИИЛ бетонов и строительных материалов Белорусского национального технического университета, г. Минск, Беларусь

durability by residual frost resistance criterion. This criterion is based on the results of experimental study of change tendencies (deterioration) of durability and operation characteristics (frost and salt resistance) of heavy concrete upon combined effect of aggressive operation environment and mechanical loads.

ВВЕДЕНИЕ

Состояние проблемы

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 [1]; более сложное по математическим зависимостям и методике предложение, составившее основу структурно-механического метода ускоренного (ГОСТ 10060.4

[2]) 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-х годах прошлого века, на базе которых в ГОСТ 10060.3 [3] 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 [4] 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 [5, 6, 7].

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, 8-16], включая основы теории миграции влаги в пористых телах [17, 18], позволяет констатировать, что механизм постепенного разрушения структуры бетона, подвергаемого попеременному замораживанию и оттаиванию в насыщенном водой состоянии, представляет собой комплексное сочетание деструктивных факторов, включая: давление льда при кристаллизации свободной воды; гидродинамические воздействия при ее перемещении (миграции) под влиянием градиента тепла и влагосодержания (термовлагопроводности); гидростатическое давление заземленной в тупиковых порах и дефектах структуры жидкости; напряжения, возникающие от разницы температурных деформаций составляющих бетона и цементного камня (т.е. на макро- и микроуровне, в зонах контакта как цементного камня с заполнителями, так и между 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 [19], 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 [20-27] следующим: во-первых, кристаллизационным давлением накопившейся соли, образовавшейся в результате перенасыщения ее раствора в малых по объемам дефектных местах 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, действие на бетон дополняется усилением процесса миграции жидкой фазы и ростом влагоемкости бетона. Соответственно под нагрузкой в нем возрастает, в сравнении с водой,

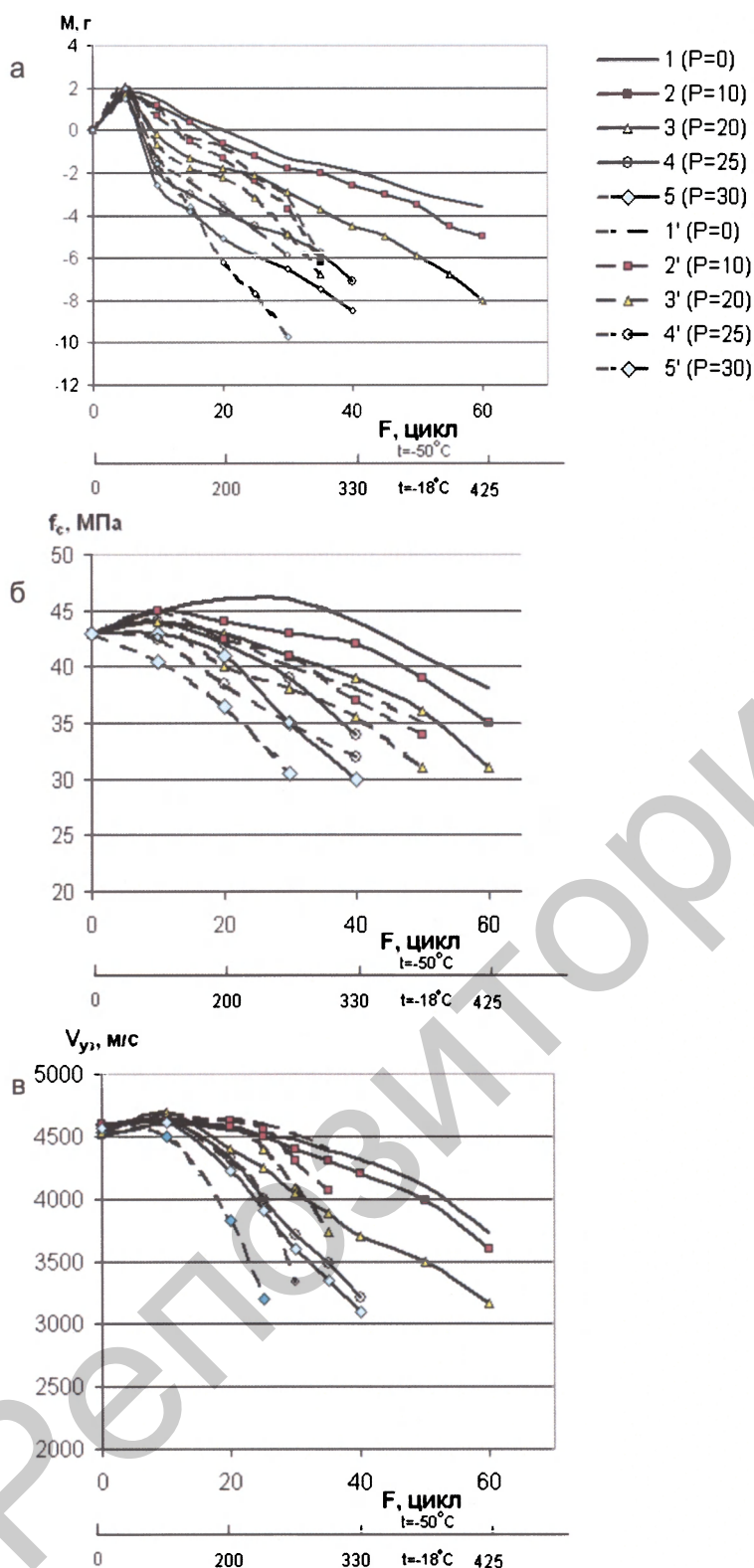
проявление «эффекта Ребиндера», т.е. раскливающего действия тонких пленок жидкости-раствора в устье трещин (дефектов структуры). В-третьих, возникает напряженное состояние на уровне микроструктуры цементного камня из-за локально проявляющегося эффекта от перепада (градиента) температур (эндокринный эффект), 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, вызывают проявление процессов растворения – кристаллизации попавшей в его поры соли с образованием кристаллогидратов, увеличивающихся в объеме, а также эндокринного эффекта, то есть сопровождаются 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. Несмотря на то, что еще в 30-х годах XX века Ю.А. Нилендер выявил непосредственное влияние напряженного состояния бетона в результате внешних (и «внутренних») воздействий на его морозостойкость и долговечность и в 50-60-х годах под руководством В.М. Москвина [27] 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 [5], а также на морозо- и солестойкость [6, 7]. 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 %-ном 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 %-ном растворе NaCl) и скоростью ультразвука как при «сквозном», так и при ее определении «прозвучиванием» с поверхности. При этом взаимосвязь «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_{y3}) и прочности бетона явилось то, что скорость ультразвука начинает снижаться раньше и значительнее (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 основании этого и исходя из результатов выполненных экспериментов, частично представленных на рисунках 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 (рис. 1в, 2в), разработана и предлагается



Условные обозначения: сплошные линии №1-5 для среды - воды; пунктирные линии №1'-5' для 5 %-ного раствора NaCl

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

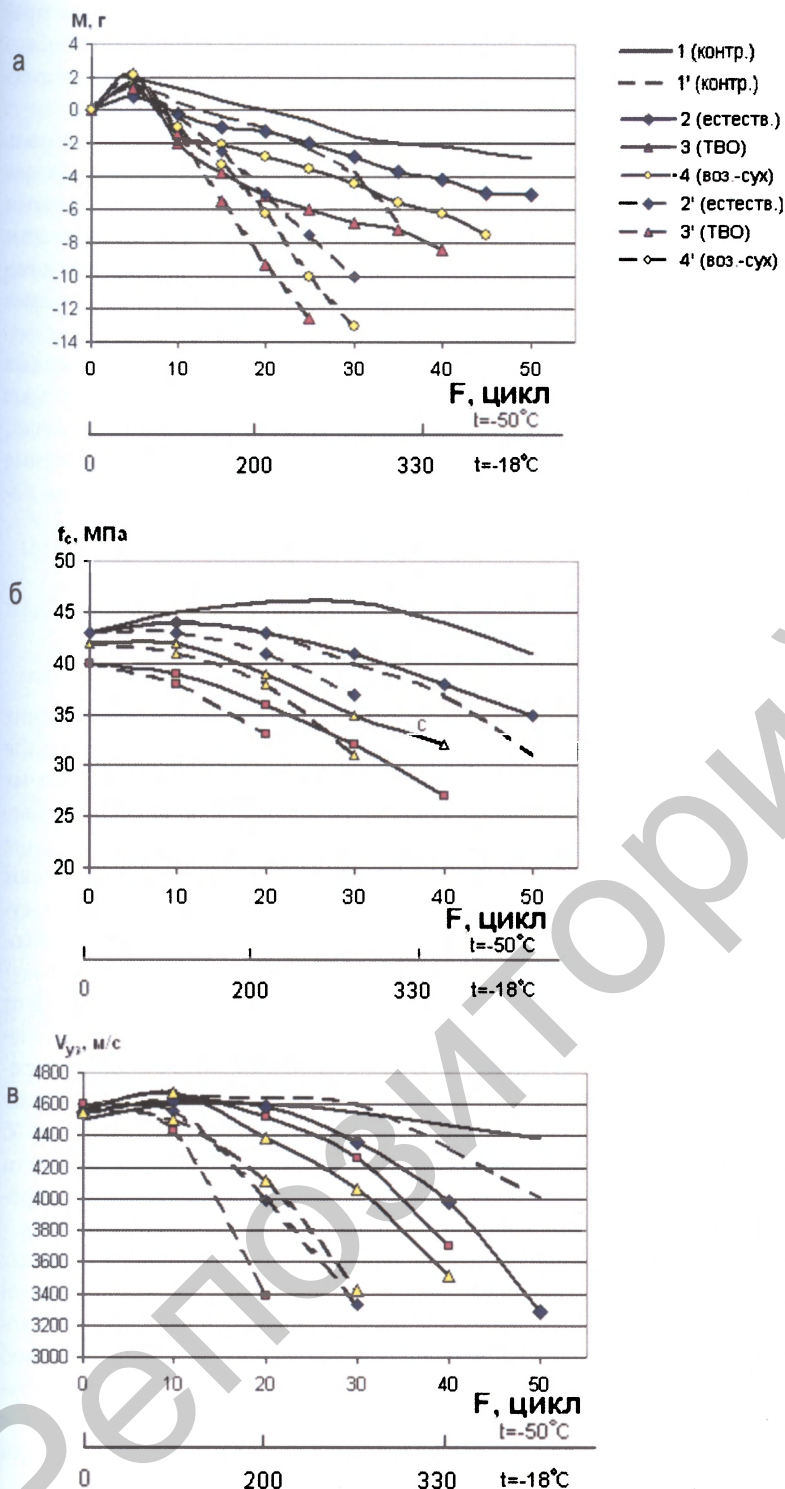
методика оценки фактического состояния бетона эксплуатируемых покрытий. Для этого по ее положениям (используя данные контроля влажности и скорости ультразвука) определяют количество «накопленных» к моменту проверки бетона циклов стандартных испытаний, а затем, с учетом известных данных о его исходной (требуемой) морозостойкости, устанавливают количество циклов «оставочной» морозостойкости бетона и на этом основании – ожидаемый период эксплуатации (долговечность).

При установлении представленных на рисунках 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), цемент белорусских заводов (без и с минеральными добавками), варьируя расход вяжущего (350-600 кг на 1 м³ бетона); водоцементное отношение (0,3-0,45), а также степень уплотнения и условия твердения образцов [5, 6, 7].

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 ударами копра плотномера динамического (СТБ 1242 [28]; масса груза ~ 2,5 кг; высота падения – 300 мм; точка касания – острие конуса с углом при вершине 60 град) по одной из их поверхностей через каждые 5 циклов замораживания - оттаивания.

Для получения сравнительных характеристик в каждой партии образцов бетона имелись контрольные, которые подвергали циклическому заморажива-



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

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

нию - оттаиванию без дополнительного воздействия механических нагрузок.

Обработка и оценка результатов испытаний выполнена в соответствии с требованиями действующих нормативов. Их анализ, включая данные рисунка 1, показал, что статическая механическая нагрузка (сжатие) на бетон оказывает существенного влияния на его свойства при циклических воздействиях до уровня ~ 40 % от прочности (кубиковой) проектного возраста; ее повышение до 50 % активизирует деструктивные явления, а превышение (60-70) %-ного уровня сопровождается ускоренным снижением долговечности бетона. Это непосредственно связано с тем, что при нагрузке более 40 % превышает предел нижней границы, а более 60 % - верхней границы трещинообразования в бетоне [29-33], которое затем интенсифицируется жестким циклическим воздействием на структуру бетона при замораживании - оттаивании (особенно в растворе соли).

Динамическая ударная нагрузка (рис. 2) на бетон оказывает такое деструктивное воздействие на его структуру, которое соответствует загрузке 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 их «развитию» и снижению прочности.

Выявленные закономерности «по-

ведения» бетона характерны и для других циклических воздействий в сочетании с механическими нагрузками, например, насыщения - высушивания при испытании на водо- и солестойкость. При этом под действием ударной (сосредоточенной) нагрузки резко снижается (и в меньшей мере под действием статической нагрузки, даже превышающей 60 %-ный уровень) износостойчивость бетона.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ

Методика включает разделы: оценка, прогнозирование и текущий контроль состояния бетона.

Методика оценки фактического состояния бетона элементов благоустройства (покрытий) включает следующие операции:

- а) установление вида бетона (мелкозернистый или с крупным заполнителем);
- б) выделение контролируемых участков покрытия;
- в) определение влажности бетона контролируемых участков;
- г) определение скорости ультразвука в бетоне контролируемых участков;
- д) визуальную оценку состояния рабочей поверхности контролируемых участков;
- е) оценку состояния бетона по разработанным оценочным данным.

Методика прогнозирования долговечности бетона включает:

- а) выполнение операций по оценке фактического состояния бетона;
- б) расчет «остаточной» морозостойкости бетона;
- в) расчет вероятной долговечности бетона элементов благоустройства по значению «остаточной» морозостойкости.

Методика текущего контроля состояния бетона, оценки его долговечности и эксплуатационной надежности покрытий включает:

- а) определение периодичности текущего контроля за состоянием покрытия (при рекомендуемой не менее 2 раз в год в периоды: март - апрель; сентябрь - октябрь);
- б) выполнение операций для установления фактического состояния бетона;
- в) оценку ситуации путем сравнения накопленных данных для установления динамики возможных изменений в состоянии бетона;
- г) выполнение, при необходимости, операций для расчета вероятной долговечности бетона.

В настоящей статье опускается описание правил обследования покрытий, отбора (при необходимости) образцов элементов покрытий, используемых приборов и методов контроля.

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

Затем (по правилам методики) определяют скорость ультразвука в бетоне на контролируемых участках с помощью тестеров ультразвуковых, оснащенных датчиками «точечного» приложения с базой (межосевым расстоянием) в 150 мм, по положениям ГОСТ 17624 [34].

ОЦЕНКА ФАКТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БЕТОНА

Используя установленные величины средних значений влажности бетона (W_{mi} , %), полученные по результатам обследования контролируемых участков покрытия, и данные рисунка 3 (приведены на примере мелкозернистого бетона), для каждого контролируемого участка определяют область вероятных значений скорости ультразвука и стадию, на которой находится 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 рисунках 3а и 3б сплошными графическими линиями) скорости ультразвука и определяют эти значения V_{y3} , проецируя точки пересечения на вертикальную ось.

Используя установленную область вероятных значений скорости ультразвука, ограниченную величинами наименьшей (V_{y3}^{min}) и наибольшей (V_{y3}^{max}) его скорости, оценивают, к какой стадии по состоянию структуры относится бетон данного контролируемого участка, а именно: к стадии упрочнения и стабильности структуры (стадия I по рис. 3а) или к стадии ее разуплотнения (стадия II по рис. 3б).

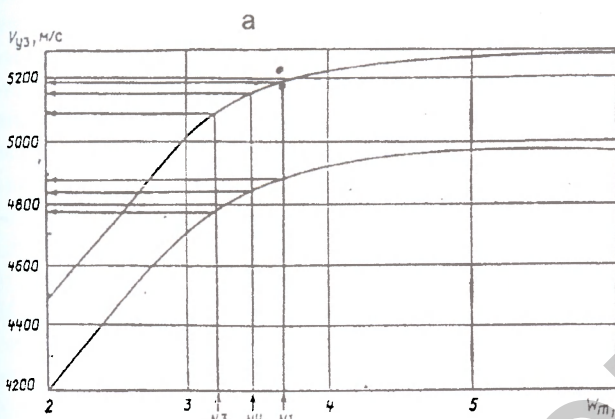
Для этого сравнивают величину среднего значения (не менее 5 замеров) скорости ультразвука оцениваемого контролируемого участка (V_{y3} , м/с) с областью вероятных ее значений в пределах: $V_{y3}^{min} - V_{y3}^{max}$ (м/с), относящихся к стадиям: I - «упрочнение (стабильность)» или к II - «разуплотнение»

* Примеры использования № 1-6 на рисунке 3 показаны на основании фактических данных проверки методики на 6 различных участках тротуарных покрытий г. Минска.

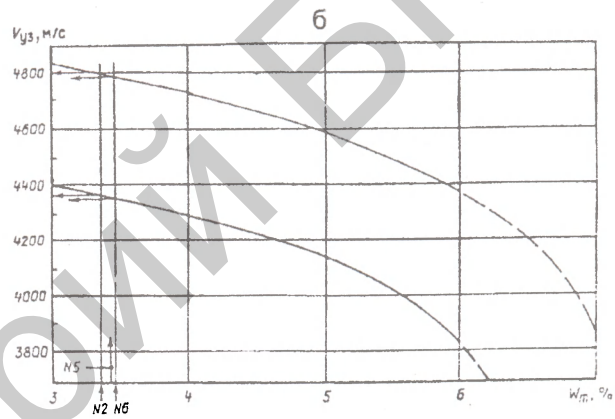
бетона. Затем, используя графики и данные рисунка 3в или 3г (в зависимости от установленной стадии, к которой относится бетон по состоянию структуры), и величину среднего значения скорости ультразвука в бетоне контролируемого участка покрытия V_{yz} (м/с), определенную по данным замеров, выявляют состояние бетона, оцениваемое количеством циклов попеременного замораживания - оттаивания в 5 %-ном водном растворе NaCl для температуры минус 18 °С (при необходимости – для $t = - (50-55) ^\circ\text{C}$). Определяют примерное количество циклов N_p , которое прошел бы бетон, характеризующийся ранее уста-

новленным состоянием структуры и скоростью ультразвука, при стандартных циклических испытаниях многократного замораживания по базовому для бетона дорожных покрытий методу по ГОСТ 10060.2 [35], а при необходимости – по методу ускоренных испытаний.

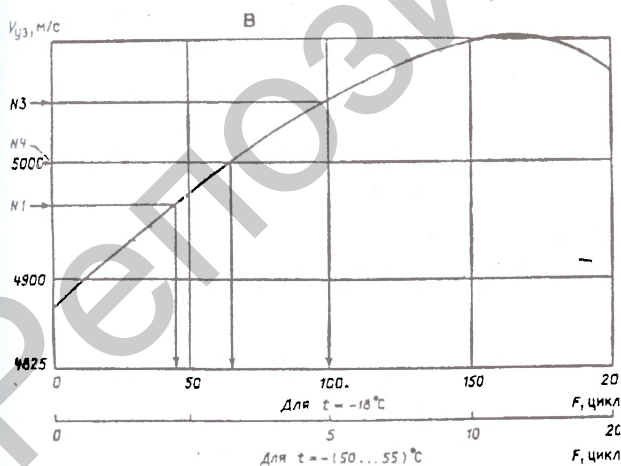
Для этого проецируют точку с вертикальной оси (рис. 3в или рис. 3г), соответствующую величине средней скорости ультразвука в бетоне оцениваемого контролируемого участка (V_{yz}), до пересечения с графической зависимостью. Последующая проекция полученной точки пересечения на горизонтальную ось дает значение примерного



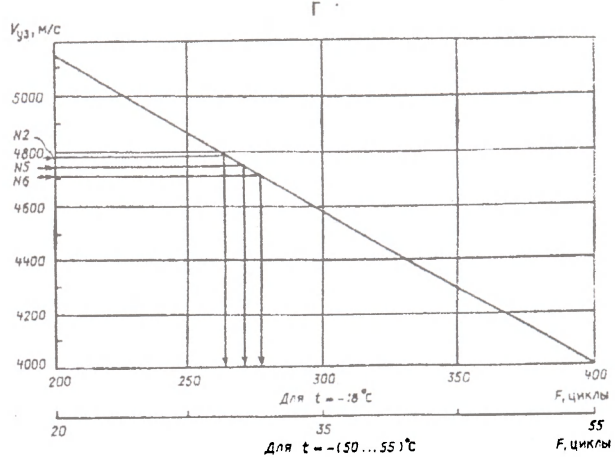
Область вероятных значений скорости ультразвука ($V_{уз}$, м/с) мелкозернистого бетона средней плотностью ρ_0 2250-2300 кг/м³ в зависимости от влажности (W_m , %) на стадии упрочнения и стабильности структуры (стадия I)



Область вероятных значений скорости ультразвука ($V_{уз}$, м/с) мелкозернистого бетона средней плотностью ρ_0 2250-2300 кг/м³ в зависимости от влажности (W_m , %) на стадии разуплотнения структуры (стадия II)



Зависимость «скорость ультразвука - морозостойкость» (циклы) для мелкозернистого бетона на стадии упрочнения и стабильности структуры (стадия I)



Зависимость «скорость ультразвука - морозостойкость» (циклы) для мелкозернистого бетона на стадии разуплотнения структуры (стадия II)

Рисунок 3 - Графические зависимости оценки фактического состояния бетона (мелкозернистого)

количества циклов стандартных испытаний (N_{Fi}), которые «прошел» бы бетон при их осуществлении, после чего состояние структуры бетона соответствовало бы тому, которое характеризует структуру бетона оцениваемого контролируемого участка покрытия.

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.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОНА

Прогнозирование ожидаемой долговечности бетона осуществляют с учетом его «остаточной» морозостойкости ($F_{осм}$) и среднестатистических данных о ежегодном количестве циклов попеременного замораживания - оттаивания бетона элементов благоустройства при их эксплуатации.

Для этого в ранее приведенной последовательности оценивают состояние бетона контролируемого участка (участков) покрытия и определяют величину N_{Fi} . По величине N_{Fi} каждого контролируемого участка покрытия определяют «стандартизированную остаточную» морозостойкость бетона ($F_{осм}^e$) как разницу между нормируемым ее значением для бетона плит тротуаров или камней бортовых (принимаемым по данной методике

F_{250}) и N_{Fi} по зависимости

$$F_{осм} = 250 - N_{Fi}, \text{ циклов.} \quad (1)$$

Затем, пользуясь установленным значением $F_{осм}^e$ вычисляют ожидаемую «стандартизированную» долговечность бетона (D_i , в годах) по зависимости

$$D_i \sim F_{осм}^e / N_{np}^{zod}, \text{ лет (стандартизированная).} \quad (2)$$

Для оценки вероятной ожидаемой долговечности (D_i^e , в годах) эксплуатации покрытий целесообразно исходить не из стандартных 250 циклов испытаний, а не менее чем из 400 циклов (после которых бетон мелкозернистый ($W_m \leq 5\%$), согласно полученным в настоящих исследованиях данным, сохраняет прочность на сжатие на уровне ≥ 30 МПа, а бетон ($W_m \leq 4,5\%$) со щебнем ≥ 35 МПа при потерях массы не более 5%). Расчет остаточной морозостойкости бетона ведут по зависимости

$$F_{осм}^e = 400 - N_{Fi}, \text{ циклов,} \quad (3)$$

а вероятную ожидаемую долговечность бетона (D_i^e , в годах), вычисляют по зависимости

$$D_i^e \sim F_{осм}^e / N_{np}^{zod}, \text{ лет (вероятная),} \quad (4)$$

с учетом «приведенных» циклов (таблица 1).

Таблица 1 - Расчетное количество среднегодовых «приведенных» циклов

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

Примечания:
 1 Статическая нагрузка включает нагрузку от «резино-колесной» техники.
 2 Динамическая нагрузка включает ударную и сосредоточенноприложенную нагрузку от жестких опорных элементов колесной техники.
 3 Завершающая фаза стабильного состояния бетона соответствует значениям скорости ультразвука после максимума по рисунку 3в.

Долговечность бетона предлагается рассчитывать с учетом вида и значений эксплуатационных механических нагрузок (таблица 1), а также среднегодовых данных о количестве природных циклов за холодный период года в климатической зоне эксплуатации покрытия. Например, для г. Минска (по среднестатистическим данным Госучреждения «Республиканский гидрометеорологический центр») количество переходов температуры через отметку «0 °С» за холодные периоды года составляет около 80-110 раз, что соответствует, примерно, 45 «циклам» замораживания - оттаивания среднегодично.

В формулах (2) и (4) для оценки долговечности бетона (в годах) следует использовать значения «приведенных» циклов ($N_{пр}$), учитывающих отличие естественных циклов замораживания - оттаивания от циклов стандартизированных испытаний по совокупности факторов: отличий в градиенте температуры и ее абсолютных значений, продолжительности естественных циклов, колебаний влажности бетона, продолжающегося коррозионного воздействия соли в теплый период года, не поддающихся прямому учету механических воздействий и прочего. С учетом изложенного, а также на основании анализа результатов выполненных исследований и опыта эксплуатации (обследований; испытаний продукции различных предприятий и др.) покрытий из вибропрессованных изделий в Беларуси среднегодовое количество «приведенных» циклов для нашей климатической зоны может быть принято: $N_{пр}^{2000} = 12,5-25$ циклов/год, в зависимости от условий эксплуатации покрытий (таблица 1). При разработке данных таблицы исходили из условия, что долговечность покрытий из бетона морозостойкостью F250 должна быть не менее 20 лет.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПРИЧИН ДЕСТРУКЦИИ БЕТОНА

Анализ полученных результатов обследования покрытия выполняется после обработки данных замеров по отдельным контролируемым участкам и оценки фактического состояния бетона, а также расчета (при необходимости) вероятной долговечности бетона элементов благоустройства обследуемого покрытия или его участков с учетом конкретных эксплуатационных условий, включая наличие или отсутствие механических нагрузок.

По этим документам дается оценка состояния покрытия в целом или его отдельных участков. При необходимости планируются мероприятия и сроки по ремонту покрытия и объемы ремонта.

В случае установленных значительных нарушений структуры бетона, то есть при проверке его состояние отнесено к стадии II (разуплотнение структуры), выполняют оценку причин деструкции бетона.

Оценка причин деструкции бетона включает:

- выявление срока эксплуатации покрытия;
- выявление условий эксплуатации покрытия по критерию химико-физической агрессии эксплуатационной среды (вид и интенсивность использования химических реагентов - антиобледенителей);
- выявление условий устройства покрытия во время ведения строительных работ и условий последующей эксплуатации покрытия на наличие и интенсивность механических нагрузок (особенно в случаях «раннего» проявления дефектов);
- установление нормируемых физико-технических характеристик бетона при устройстве покрытия и прочности бетона на момент обследования;
- анализ причин, вызвавших деструкцию бетона.

Гарантированным сроком эксплуатации тротуарных покрытий, устроенных из вибропрессованных элементов мощения, средняя плотность бетона которых была $\rho_b > 2250$ кг/м³ при водопоглощении $W_n \leq 5$ % для мелкозернистого бетона и $\rho_b \geq 2350$ кг/м³ при $W_n \leq 4,5$ % для бетона со щебнем, выдержавших стандартизированные испытания на морозостойкость, соответствующую марке F250 в 5 %-ном растворе NaCl, и эксплуатируемых без механических воздействий, превышающих нижнюю границу трещинообразования бетона (уровень нагрузок ≤ 40 % проектной прочности на сжатие), следует считать период не менее 20 лет.

В случае преждевременного проявления признаков разрушения бетона, у которого показатель морозостойкости на момент устройства покрытия соответствовал требованиям действующих нормативов, оценивают возможное дополнительное влияние химических реагентов-антиобледенителей, отличающихся от хлористых солей натрия (и) или калия, для которых получены приведенные в методике зависимости.

Проверка предлагаемой методики оценки «текущего» состояния бетона, выполненная путем обследования в различных местах г. Минска покрытий из тротуарных плит (разных лет их производства и устройства), подтвердила достаточный для практического использования уровень достоверности полученных при этом данных и сделанных на их основе выводов о состоянии и вероятной долговечности бетона. В частности, несмотря на то, что в процессе обследования (см. рис. 3) три из шести объектов (№ 2; № 5 и № 6 на рис. 3) по

состоянию бетона были отнесены ко II стадии (т.е. прогрессирующее разрушение) после 6-8 лет эксплуатации, против этого заключения не возражали ни технологические службы, ни руководство организации, производившей и поставившей на данные объекты тротуарную плиту. Кроме этого, предлагаемая разработка успешно прошла экспертную апробацию при сдаче результатов исследований заказчику в лице Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика контроля, оценки фактического состояния и прогнозирования вероятной долговечности тяжелого (мелкозернистого и содержащего крупный заполнитель) бетона в процессе эксплуатации покрытий из бетонных элементов. Она обеспечивает условия как для осуществления оперативного контроля состояния бетона, так и для организации периодического «контроля-мониторинга» с целью планового наблюдения за состоянием бетонных покрытий различного назначения.

Используемый (и доступный) инструментарий неразрушающего контроля (установления) необходимых для реализации методики параметров бетона обеспечивает возможность ее широкого применения.

Принципы контроля состояния бетона, составляющие базу предложенной методики, обеспечивают возможность ее видоизменения по параметрам: вид бетона – эксплуатационная среда, количество циклов воздействия – долговечность – с целью применения для оценки фактического состояния бетона строительных конструкций различных видов и условий эксплуатации.

Литература

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. Бетоны. Структурно-механический метод ускоренного определения морозостойкости: ГОСТ 10060.4-95.
3. Бетоны. Диламометрический метод ускоренного определения морозостойкости: ГОСТ 10060.3-95.
4. Бабицкий, В.В. *Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона: дис. ... докт. технич. наук / БИТУ.* – Минск, 2005. – С. 118-131.
5. 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.
6. 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.
7. Батяновский, Э.И. *Морозо- и солестойкость бетона, подверженного механическим нагрузкам / Э.И. Батяновский, А.И. Бондарович // Вестник БИТУ.* – 2007. – № 1. – С. 5-16.
8. Шестоперов, С.В. и др. *Цементный бетон в дорожном строительстве.* – М.: Дориздат, 1950. – 132 с.
9. Стольников, В.В. *Исследования по гидротехническому бетону.* – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1953. – 330 с.
10. Дементьев, Г.К. *Условие долговечности бетона и железобетона.* – Куйбышев: Куйбышевское книгоиздат., 1955. – 120 с.
11. 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.
12. Конопленко, А.И. *К вопросу теории морозостойкости бетона // В сб. тр. Ростовского инженерно-строит. института.* – Вып. XII. – Ростов-на-Дону, 1958.
13. Мощанский, И.А. *Повышение стойкости строительных материалов и конструкций, работающих в условиях агрессивных сред.* – М.: Госстандарт, 1962. – 235 с.
14. Collins, A. *The destruction of concrete by frost.* - Institute of Civil Engineers, 1944 nov. - P. 5412.
15. Powers, T.A. *Working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete.* - J. Am. Coner. Inst., 1945. - № 4. - V. 16.
16. Powers, T., Helmut, R. *Theory of volume changes in hardened portland – Cement paste during freezing / Proceedings Hig way Research Board,* 1953. - V. 32.
17. Цытович, Н.А., Сумгин, М.И. *Основания механики мерзлых грунтов.* – М.: Изд. АН СССР, 1937. – 432 с.
18. Лыков, А.В. *Тепло- и массообмен в процессах сушки.* – М.; А.: Госэнергоиздат, 1956. – 464 с.
19. Батяновский, Э.И. *Особо плотный бетон сухого формования.* – Минск: НП ООО «Стринко», 2002. – С. 103-108.

20. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин, Ф.М. Иванов, С.Н. Алексеев и др. – М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.
21. Ахвердов, И.Н., Станишевская, И.В. Механизм разрушения пористых материалов при насыщении их солями / ДАН БССР. – Минск, 1967. – Т. 11. – № 4. – С. 320-323.
22. Алексеев, С.Н., Розенталь, Н.К. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде. – М.: Стройиздат, 1976. – 205 с.
23. Иванов, Ф.М. Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии. – М.: Транспорт, 1968. – 175 с.
24. Путан, А.А., Барташевич, А.А. Оценка кристаллизационных давлений в пористых средах методом фотоупругости // Методы исследований стойкости строительных материалов и конструкций. – Минск: Выш. школа, 1969. – С. 60-69.
25. Гузеев, Е.А., Савицкий, Н.В. Расчет железобетонных конструкций с учетом кинетики коррозии бетона третьего вида // Сб. научн. трудов НИИЖБ / Под общ. ред. С.Н. Алексеева. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1988. – С. 16-20.
26. Шалимо, М.А. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. – Минск: Выш. школа, 1986. – 200 с.
27. Москвин, В.М., Подвальный, А.М. Морозостойкость бетона в напряженном состоянии // Бетон и железобетон, 1960. - № 2. – С. 58-64.
28. Плотномер динамический. Технические условия: СТБ 1242-2000.
29. Берг, О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. - М.: Госстройиздат, 1962. – 96 с.
30. Берг, О.Я. О предельном состоянии железобетонных конструкций по долговечности // Бетон и железобетон. - 1964. - № 11. – С. 486-488.
31. Берг, О.Я., Галузо, Г.С. Усталостная прочность аглопоритобетона // Бетон и железобетон. - 1969. - № 10. – С. 21-23.
32. Галузо, Г.С. Исследование прочности и деформации аглопоритобетона при действии статической и многократноповторяющейся сжимающих нагрузок: автореф. дис. ... канд. технич. наук / БПИ. - Минск, 1969. – 25 с.
33. Берг, О.Я. Высокопрочный бетон / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко. – М.: Стройиздат, 1971. – 208 с.
34. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности: ГОСТ 17624-87.
35. Бетоны. Ускоренные методы определения морозостойкости при многократном замораживании и оттаивании: ГОСТ 10060.2-95.