

веденный совместно с анализом результатов прочностных испытаний бетона, подтвердил эффективность выполненного утепления, обеспечившего снижение теплопотерь в камерах и повысить прочность бетона после термообработки.

Экспериментальная часть выполнена при участии сотрудников технологического отдела завода Е.В.Римашевской и Г.М.Бибука (подготовка и программирование измерителей-регистраторов, считывание информации) и И.И.Тулупова (обработка и анализ данных).

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Коротков С.Н. Методические основы выявления резервов и планирования экономии энергоресурсов на предприятиях сборного железобетона / С.Н.Коротков // Всесоюзный научно-

практический семинар по повышению эффективности использования топливно-энергетических ресурсов при производстве сборных железобетонных конструкций и изделий: Тезисы докл.- Ленинград, 1984. - С. 48-52.

2. Малинина Л.А. Снижение энергетических затрат при производстве сборного железобетона за счет рационального выбора цементов, назначения эффективных режимов термообработки бетона и учета экзотермии/Л.А.Малинина//Всесоюзный научно-практический семинар по повышению эффективности использования топливно-энергетических ресурсов при производстве сборных железобетонных конструкций и изделий: Тезисы докл.- Ленинград, 1984. - С. 53-58.

3. Что такое термохрон? [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.elin.ru/Thermochron/?Topic=whatis>.

Материал поступил в редакцию 10.02.09

#### **BIBIK M.S. The temperature monitoring of process is warm a moisture of processing in chambers firing ground such as and modernization of chambers with the purpose of decrease warmly of losses**

In clause the results of temperature monitoring of process warmly a moisture of processing in steaming chambers firing ground such as in ОАО "A Factory of modular ferro-concrete №1" with application measuring instrument - registrars DS 1921 systems "Termochron" are submitted. The data of the carried out monitoring were used at acceptance of the constructive decisions on утеплению separate steaming of chambers with the purpose of decrease warmly of losses. The comparative data of monitoring of a number of chambers before and after утепления are given which allow to make a conclusion about efficiency of the accepted decisions.

УДК 666.71/.72

**Никитин В.И., Бацкель-Бжозовска Б.**

### **МЕТОДИКА ОЦЕНКИ МОРОЗОСТОЙКОСТИ БЕТОНА НА ОСНОВЕ КРИТИЧЕСКОГО УРОВНЯ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ**

**Введение.** Морозостойкость стеновых материалов, эксплуатируемых в неблагоприятных климатических условиях, является одним из основных показателей их долговечности. Выявлению механизмов деградации увлажненных строительных материалов при циклическом замораживании и оттаивании, разработке методов и критериев оценки их морозостойкости посвящено большое количество работ. Однако анализ результатов этих работ часто приводит к неоднозначным и даже противоположным выводам. При такой ситуации в странах объединенной Европы до сих пор не завершены работы по выбору общепринятой методики исследования морозостойкости бетонов и других строительных материалов, которая могла бы быть рекомендована европейскими нормами в качестве обязательной.

По мнению авторов данной работы, в настоящее время на основе известной концепции накопления повреждений и многочисленных данных, представленных в литературе, можно предложить довольно простую методику оценки морозостойкости бетона. Согласно этой методике, процесс деградации образцов материала при циклическом замораживании и оттаивании отслеживается вплоть до полного разрушения образцов и определяется критический уровень накопления повреждений, который далее используется в качестве количественной оценки морозостойкости бетона.

**1. Предварительный анализ экспериментальных данных.** В результате анализа известных литературных данных и результатов собственных исследований, отражающих изменения выбранных показателей свойств или признаков деструкции образцов капиллярно-пористых строительных материалов (таких как прочность, пористость, утрата массы и др.) при циклическом замораживании и оттаивании до их полного разрушения, выяснилось, что наблюдаемый процесс деструкции образцов материалов характеризуется двумя основными этапами. Первый этап отличается от второго заметно меньшей скоростью деструкции образцов испытываемого материала и, как правило, большей продолжительностью. Причем такой двух-

этапный процесс наблюдается для образцов различных материалов, отличающихся размерами и формой, при объемном и одностороннем замораживании в воздушной и водной среде при различном содержании водорастворимых солей.

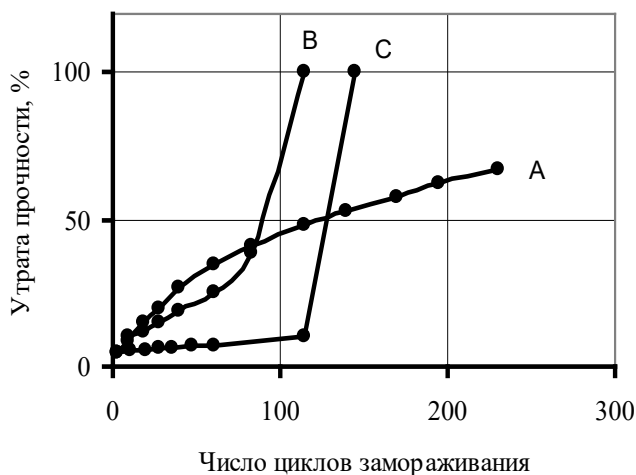
Для иллюстрации сказанного на рисунке 1 приведены данные, взятые из работы [1], которые показывают кинетику утраты массы образцов бетона кремнистой пыли и без нее при циклическом замораживании и оттаивании. Из этого рисунка видно, что образец бетона без добавки пыли кремния даже после 230 циклов замораживания и оттаивания не достиг полного разрушения (кривая А), а образцы бетона, содержащие эту добавку, полностью разрушились к сто тридцатому циклу (кривые В и С). При этом продолжительность первого этапа накопления повреждений превысила продолжительность второго более быстрого этапа накопления повреждений примерно в 2,5 раза для случая В и почти в 5 раз для случая С. В работе [1] приведено большое количество графической информации об утрате массы образцами бетона в результате поверхностного шелушения при одностороннем замораживании и оттаивании под слоем чистой воды и 3% водном растворе NaCl. Образцы бетона готовились с использованием различных воздухововлекающих минеральных добавок. При испытаниях этих образцов до полного разрушения зависимость накапливаемой утраты массы от числа циклов одностороннего замораживания и оттаивания во всех случаях имела вид кривых В и С, показанных на рис. 1.

Другой пример, заимствованный из работы [2] и приведенный на рисунке 2, показывает изменение (утрату) прочности при сжатии в процессе стандартного объемного замораживания и оттаивания четырех серий образцов цементного бетона, предназначенного для верхнего слоя дорожного покрытия, размером 0,1x0,1x0,1 м. Образцы одной серии отличались от образцов других серий только степенью уплотнения бетонной смеси. Как видно из рисунка 2, после 225 циклов замораживания и оттаивания скорость утраты прочности резко возрастает и по достижении 300 циклов образцы III и IV серий

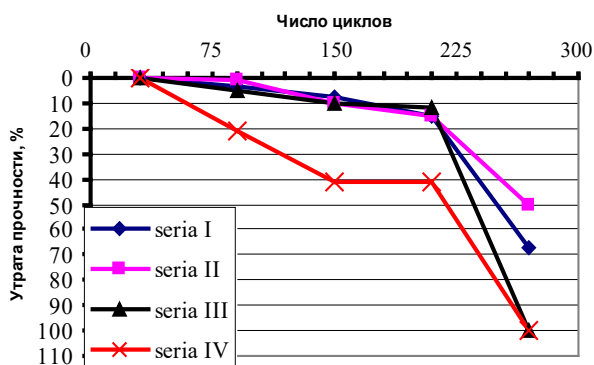
*Никитин Вадим Иванович, доктор технических наук, профессор Политехники Белостоцкой, Польша.*

*Бацкель-Бжозовска Беата, кандидат технических наук Политехники Белостоцкой, Польша.*

распались на отдельные куски прямо в морозильной камере, а образцы остальных двух серий разрушились после приложения незначительной сжимающей силы. Это свидетельствует об объемном характере накопления повреждений.



**Рис. 1.** Морозостойкость бетона с добавкой кремнистой пыли и без нее; В – вода, Ц – цемент, К – кремнистая пыль. Peterson (1986) [1]  
 $A: B/C = 0,35; K/C = 0; B: B/(C+K) = 0,53; K/C = 0,11; C: B/(C+K) = 0,35; K/C = 0,19$



**Рис. 2.** Среднее снижение прочности бетонных образцов на сжатие при циклическом замораживании и оттаивании [2]

О накоплении морозных повреждений во внутренних слоях образцов бетона могут свидетельствовать также данные работы [3], в которой с помощью микроскопического анализа показано, что циклическое замораживание и оттаивание приводит к непрерывному возникновению все новых микротрещин и росту уже существующих. В определенный момент необратимый процесс трещинообразования приводит к разрушению бетонных образцов.

Одновременно с утратой прочности авторами работы [2] показано, что утрата массы образцами бетона до 225 цикла была значительно меньше граничного значения 5%, рекомендованного нормой. Однако уже после 300 циклов замораживания и оттаивания образцы бетона утратили массу на величину, превышающую указанную границу. Таким образом, переход процесса деструкции образцов бетона от первого (медленного) ко второму (быстрому) этапу накопления повреждений по двум различным показателям (утрата прочности и массы) происходит при одинаковом значении числа циклов замораживания и оттаивания. Оказалось, что в данном случае продолжительность первой стадии накопления повреждений в три раза превышает продолжительность второй стадии.

Отмеченная особенность процесса накопления морозных повреждений характерна и для других строительных материалов. Двухэтапный процесс накопления повреждений в виде шелушения и выкрашивания наблюдался нами при оценке морозостойкости образцов стеновой керамики с учетом состава керамической массы и

условий обжига [4]. Наличие двух этапов накопления повреждений подтверждается также данными работы [5], в которой приведены результаты изучения кинетики образования дефектов в образцах керамического материала в процессе замораживания и оттаивания до полного их разрушения. Кинетика морозного разрушения образцов характеризовалась глубиной развития разрушающей трещины. Установлено, что полное разрушение образца происходит в тот момент, когда глубина проникновения трещины достигает величины равной 70-80 % от средней толщины образца независимо от технологии его изготовления. Анализ графической информации показал, что для исследованных образцов керамического материала продолжительность первого медленного этапа накопления дефектов превышает продолжительность второго этапа в 2-3 раза.

В работе [6] представлены экспериментальные данные об изменении коэффициента теплопроводности некоторых полимерных теплоизоляционных материалов в зависимости от числа циклов замораживания и оттаивания. Характерно, что на первом этапе испытаний образцов (примерно 80-90 циклов) значения коэффициента теплопроводности практически не меняются, а далее начинается его быстрое увеличение. Не случайно концепция существования двух стадий накопления повреждений от эксплуатационных воздействий положена в основу одного из методов определения эксплуатационного ресурса полимерсодержащего теплоизоляционного материала и расчета долговечности ограждающих конструкций с его применением [7].

На основании рассмотренных примеров можно сделать вывод, что первый этап циклических воздействий отвечает процессу старения и накопления повреждений, когда число микротрещин в единице объема не достигло еще критического значения, по достижении которого начинается этап необратимого усталостного разрушения бетона и других строительных материалов. В таком случае есть основание считать, что число циклов замораживания и оттаивания, при котором начинается переход от первого этапа накопления повреждений ко второму, может быть принято в качестве оценки морозостойкости бетона. Остается только разработать процедуру определения этой оценки. Ниже приведена одна из возможных процедур. При ее разработке использовались экспериментальные данные работы [8], в которой необходимый содержательный и формальный (статистический) анализ полученных данных не был выполнен. Этот пробел восполняется нами в следующем разделе работы.

**2. Анализ данных работы [8] и дискуссия.** Данные о морозостойкости бетонных образцов приведенные в работе [8], были получены с помощью метода прямого замораживания, учитывающего рекомендации шведской нормы SS 13 72 44 (метод Bogaas). Накапливающаяся в процессе замораживания и оттаивания бетонных образцов масса частичек материала, утративших когезию на единицу поверхности, использовалась в качестве показателя степени деструкции бетона. Сокращенно этот показатель будем называть утратой массы и обозначать буквой  $m$ . Циклическим воздействиям отрицательных и положительных температур подвергались водонасыщенные образцы бетона в виде пластинок размером 15 x 15 x 5 см, поверхность верхней грани которых (15 x 15 см) находилась под слоем 3% водного раствора NaCl, а поверхности остальных граней были закрыты слоем гидро- и теплоизоляционного материалов.

При изготовлении образцов использовались два вида портландцемента, которые условно были обозначены как С1 и С2. С целью повышения морозостойкости бетона часть образцов содержала модифицирующую добавку битумной пасты, являющейся раствором асфальта в органическом растворителе (технической нефти). Рецептура бетонов, технология подготовки образцов к испытаниям и температурный режим цикла замораживания и оттаивания подробно описаны в работе [8].

В результате циклического замораживания и оттаивания образцов вплоть до разрушения для каждого образца был получен ряд значений утраты массы

$$m_1, m_2, \dots, m_n \quad (1)$$

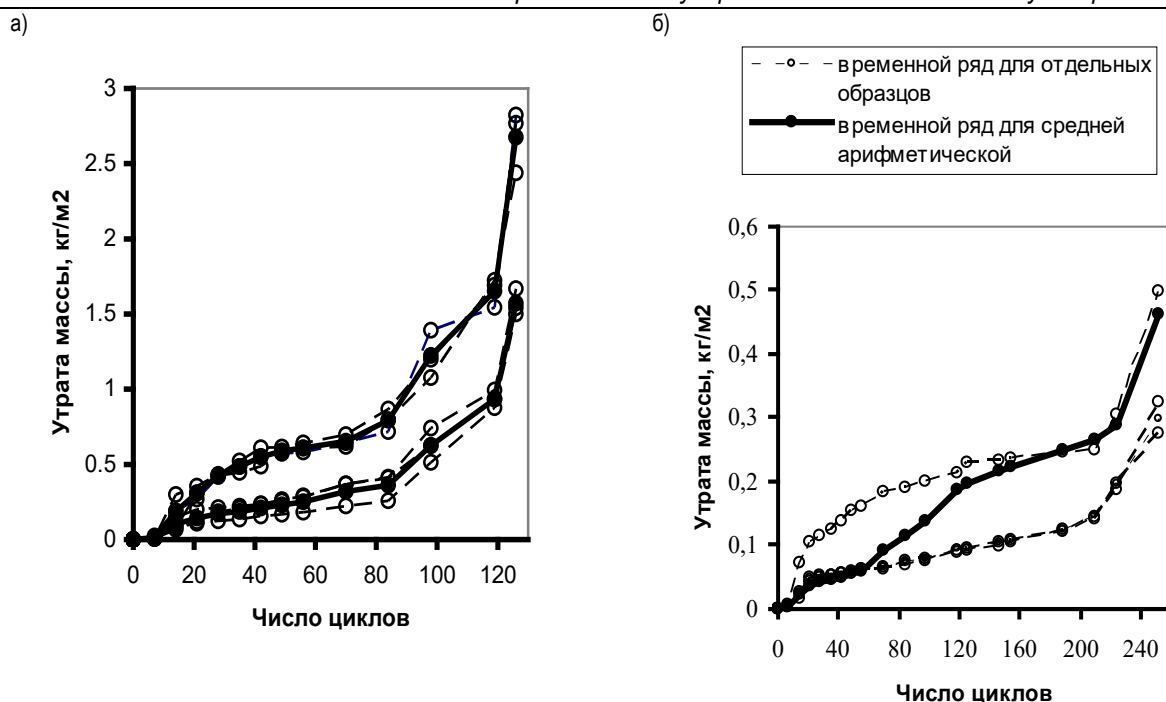


Рис. 3. Утрата массы бетонных образцов в зависимости от числа циклов замораживания и оттаивания: а) обычный бетон, б) бетон с добавкой битумной пасты

зарегистрированных в последовательные моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , которым соответствовало число циклов  $N_1, N_2, \dots, N_n$ . Графическое отображение последовательностей наблюдений вида (1) для четырех групп образцов различных составов представлено на рисунке 3, из которого видно, что до момента разрушения все образцы прошли два характерных этапа накопления повреждений. Каждая группа состояла из трех образцов одинакового состава, которые нельзя рассматривать в качестве повторных экспериментальных единиц 3-х элементной случайной выборки из генеральной совокупности, так как они изготавливались одновременно и из одного замеса. Такие образцы составляют группу (выборку) так называемых образцов-близнецов и независимо от их численности не могут достаточно полно характеризовать случайную величину  $m$ .

После усреднения рядов (1) для образцов-близнецов был получен новый ряд, описывающий изменение среднеарифметического значения анализируемой переменной  $m$  в зависимости от номера цикла ее наблюдения

$$\bar{m}_1, \bar{m}_2, \dots, \bar{m}_n. \quad (2)$$

Последовательность наблюдений вида (1) или (2) принято называть временным рядом. Такой ряд может подчиняться некоторым закономерностям и для него не выполняются допущения, принятые в классической модели регрессионного или дисперсионного анализов. Члены временного ряда, рассматриваемые как случайные величины, не являются ни статистически независимыми, ни одинаково распределенными. В частности, значение величины  $m$ , которое мы получили в произвольный момент времени, может существенно зависеть от того, какие значения были зарегистрированы до этого момента времени. Такую зависимость можно выявить при изучении физической сути процесса или формальным путем, используя различные статистические тесты.

Для использования последовательностей (1) или (2) можно использовать достаточно основательно разработанный раздел математической статистики – анализ временных рядов. Целью этого анализа является выявление и описание закономерностей, характеризующих устойчивое, систематическое изменение значений анализируемой величины за длительное время (тренд временного ряда), периодические (сезонные) колебания и случайные колебания. Наличие таких закономерностей часто можно установить на основе анализа графика временного ряда. Например, на рисунке 3 видна

устойчивая тенденция двухэтапного возрастания значения утраты массы во времени  $m(N)$  (функция тренда), на которую накладываются случайные колебания.

Для выделения функций тренда  $m(N)$  необходимо исключить из временного ряда случайные колебания. При решении этой задачи в теории временных рядов используется несколько статистических методов, начиная от простых методов выравнивания и кончая довольно сложным спектральным анализом [9]. В нашем случае (см. рис. 3) временной ряд средних значений вида (2) по трем образцам-близнецам уже неплохо решает задачу исключения случайных колебаний из временного ряда. Еще лучше эта задача решается при увеличении числа таких образцов до 5-7. С целью более полного исключения из временного ряда случайных колебаний можно аппроксимировать данные вида (2) подходящей функцией, интерпретируя функцию тренда как регрессию исследуемой переменной по фактору времени. При выборе аналитического вида регрессионной зависимости прежде всего необходимо учитывать физическую сторону изучаемого явления.

Из анализа кривых (см. рис. 3), построенных по данным ряда (2), видна довольно сложная зависимость, аппроксимировать которую будет не просто. Можно заметить, что за первые семь циклов замораживания и оттаивания регистрируется очень незначительная утрата массы. Имеет место скрытый период накопления вертикальных и горизонтальных микротрещин, которые образуются под действием статического (увеличение объема воды при ее замерзании) и динамического (миграция влаги в процессе замораживания) механизмов разрушающего действия замерзающей влаги и еще не приводят к утрате когезии мелких частичек бетона. Возникновение и накопление горизонтальных микротрещин свидетельствует о начале расслоения бетона. При последующих циклах замораживания и оттаивания (от 7 до 30) цементно-песчаная составляющая бетона имеет четко выраженную слоистость, отмечаемую также в работе [10]. Когезия между слоями ослабевает, и начинается их отслаивание, что и подтверждается интенсивным приростом утраты массы. Интенсивному отслаиванию бетона способствует слой льда, образовавшийся на поверхности испытываемых образцов, который при снижении температуры сокращает свои линейные размеры сильнее бетона. В результате происходит отрыв (отслаивание) частиц бетона массой до нескольких грамм. Подробнее механизм разрушающего действия слоя

льда (от англ. frost salt scaling mechenist) описан, например, в работах [11, 12]. После 30 циклов замораживания и оттаивания происходят такие изменения физико-механических свойств поверхностных слоев бетона, при которых разрушающее действие упомянутого механизма ослабевает и на кривых утраты массы наблюдается почти прямолинейный участок (см. рис. 3). При этом количество вертикальных и горизонтальных трещин увеличивается и они проникают на все большую глубину. Начинается утрата крупного заполнителя, означающая переход процесса деструкции бетонных образцов от первого этапа ко второму более интенсивному, который быстро заканчивается распадом образцов на отдельные части.

Как уже отмечалось, критическое число циклов, которое соответствует моменту окончания первого этапа процесса деструкции бетона, следует принять в качестве оценки его морозостойкости. Если имеются данные вида (2) и их графическое представление как на рисунке 3, то определение критического числа циклов  $N_{кр}$  можно выполнить с помощью аппроксимирующих функций или графических приемов. Например, аппроксимировать подходящей функцией данные только первого этапа деструкционного процесса, а затем поочередно определять разницу между опытными данными второго этапа и результатами, вычисленными с помощью аппроксимирующей регрессионной зависимости. Число циклов, при котором первая из очередных разниц выйдет за рамки случайных колебаний, принимается в качестве критического  $N_{кр}$ . Для определения  $N_{кр}$  можно использовать модели авторегрессии, учитывающие статистическую зависимость (автокорреляцию) членов временного ряда. Следует отметить, что гипотеза о наличии автокорреляции после аппроксимации данных первого этапа накопления повреждений была подтверждена нами с помощью теста Дурбина-Ватсона (Durbin-Watson) [9]. И, наконец, если требуется аппроксимировать весь временной ряд, то можно воспользоваться сплайнами (от англ. spline), которые являются весьма эффективными аппроксимирующими функциями [13]. Отмеченные и другие известные методы требуют достаточно большого количества членов временного ряда (2), что делает их весьма трудоемкими при практическом решении рассмотренной задачи.

Результаты испытаний образцов цементных бетонов без модифицирующих добавок на морозостойкость до разрушения, представленные в данной работе, показали, что относительная продолжительность первого этапа накопления повреждений, обозначенная как  $K_1$ , находится в довольно узком диапазоне от 0,67 до 0,75. Так, для данных, представленных на рисунке 3а имеем: критическое число циклов замораживания и оттаивания  $N_{кр} = 88$ , общее число циклов до разрушения  $N_p = 126$ . В результате получаем  $K_1 = 88 / 126 = 0,698$ .

В связи с этим критическое число циклов можно определить по формуле

$$N_{кр} = K_1 \cdot N_p, \quad (3)$$

которая может явиться основой достаточно простого способа оценки морозостойкости бетона. Для этого потребуется зарегистрировать только момент разрушения образцов, характеризуемый числом циклов  $N_p$ , и принять значение коэффициента  $K_1$  равным, например, 0,7.

При таком подходе легко выполнять различные сравнения и количественную оценку влияния смесевых и технологических факторов на морозостойкость материала. Например, сравнивая по критерию морозостойкости  $N_{кр}$  опытные данные для бетонных образцов различных составов, показанные на рис. 3, можно прийти к выводу, что использование цемента С1 или С2 не отразится на морозостойкости бетона (см. рис. 3а). Рассмотренные два уровня количества добавки битумной пасты также не меняют морозостойкости бетонных образцов, так как в обоих случаях она оказалась равной  $N_{кр} = 210$  циклам (см. рис. 3б). При этом введение модифицирующей добавки в бетонную смесь в рассмотренном количестве увеличивает морозостойкость образцов в  $210/88 = 2,386$  раза.

Как следует из выполненного анализа, предлагаемый подход к оценке морозостойкости бетона на основе критического уровня накопления повреждений довольно прост при практической реализации и после соответствующей доработки и широкой апробации может рассматриваться в качестве стандартной методики определения морозостойкости бетона.

При доработке метода прежде всего необходимо установить обоснованные условия замораживания и оттаивания образцов и их размера. С целью сокращения продолжительности испытаний образцов до разрушения эти условия должны быть достаточно жесткими, а размеры образцов в направлении тепло- и массопереноса по возможности наименьшими. Как следует из формулы (3), точность оценивания количественного показателя морозостойкости  $N_{кр}$  в основном зависит от значения коэффициента  $K_1$ , так как при определении числа циклов в разрушение  $N_p$  нельзя существенно ошибаться. Поэтому при установленных условиях испытаний и размерах образцов необходимо накопить данные о значениях коэффициента  $K_1$ . Нам представляется, что значения этого коэффициента будут увеличиваться с увеличением числа циклов  $N_p$ .

Оценка морозостойкости  $N_{кр}$ , полученная в условиях форсированных морозных воздействий, может быть использована для оценки морозостойкости того же материала, эксплуатируемого в условиях нормальных морозных воздействий данного района  $N_{кр}^*$ . Исходя из подобия процессов деструкции одного и того же материала в условиях форсированного и нормального морозного воздействий, а также теории форсированных испытаний [14], можно записать

$$N_{кр}^* = N_{кр} \frac{v}{v^*}, \quad (4)$$

где  $v$  и  $v^*$  – скорость накопления повреждений в условиях форсированного и нормального морозного воздействий. Если известно количество циклов замораживания и оттаивания бетона в натуральных условиях за один год  $n_1^*$  (среднее за многолетний период для данного района с переходом температуры воздуха через  $0^\circ\text{C}$ ), то можно определить срок службы бетона

$$T = N_{кр}^* / n_1^*. \quad (5)$$

Предложенный метод прямого замораживания не отвергает необходимости разработки методов косвенной оценки морозостойкости бетонов, базирующихся на измерении какого-либо показателя (например, параметров пористой структуры или ее капиллярных свойств) или сочетания показателей, характеризующих морозостойкость материалов. К сожалению, как показано например в работе [15], иногда возникают сомнения в целесообразности использования некоторых косвенных методов, так как их результаты не коррелируют с результатами методов прямого замораживания.

**Заключение.** При анализе результатов испытаний образцов различных материалов (бетон, строительная керамика, пенопласт) на циклическое замораживание и оттаивание до разрушения выяснилось, что изменения различных показателей их деструкции (утрата массы, прочности и теплоизолирующей способности, а также глубина проникания разрушающих трещин) во времени характеризуется двумя этапами. Первый этап отличается от второго значительно меньшей скоростью накопления повреждений (в 4-6 раз) и большей (в 2-3 раза) продолжительностью. Показано, что момент перехода от первого этапа ко второму определяется критическим уровнем накопления внутренних повреждений, который может быть принят в качестве оценки морозостойкости материала. Рассмотрены способы определения момента этого перехода. На этой основе для оценки морозостойкости бетона предлагается метод прямого замораживания, при котором регистрируется только момент полного разрушения бетонных образцов. Для принятия этого метода в качестве стандартного потребуется его доработка, заключающаяся в выборе

форсированных условий замораживания и оттаивания бетонных образцов и их размеров, а также значение коэффициента, учитывающего соотношение между моментом полного разрушения образцов и моментом накопления критического уровня повреждения.

Статья подготовлена в рамках работы W/II B/II/06/.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Fagerlund G. Trwalosc konstrukcji betonowych. Arkady, 1987.
2. Jasiczak J., Kucz M. Aspekt mrozoodpornosci w betonach drenazowych. Mat. Konf. «Krynica 2007», T.3. S. 77-86.
3. Lelusz M. Identyfikacja zjawisk zachodzacych w strukturze porowatosci betonow cementowych w procesie ich cyklicznego zamrazania i rozmrazania. Zeszyty Naukowe Politechniki Bialostockiej, seria Budownictwo Z. 23, 2003 s. 145-155.
4. Никитин В.И., Болтрык М., Бацкель-Бжозовска Б. Влияние состава формовочной смеси и режимов тепловой обработки на морозостойкость стеновой керамики // Вестник БГТУ. – 2004. – № 1 (25): Строительство и архитектура. – С. 153-157.
5. Зеликин С.И., Землянский В.Н., Цивилев Р.П. Исследование кинетики разрушения материалов рентгенографическим методом // Стекло и керамика. – № 6. – 1979. – С.23-24.
6. Хлевчук В.Р., Артыкпаев Е.Т. Теплотехнические и звукоизоляционные качества ограждений домов повышенной этажности. – М.: Стройиздат, 1979.
7. Ясин Ю.Д., Ясин В.Ю., Ли А.В. Пенополистирол. Ресурс и старение материала. Долговечность конструкций. – Строительные материалы – № 5 – 2002. – с. 33-35.

8. Kosior-Kazberuk M. Modyfikacja betonu pizeznaczonego do konstrukcji mostowych rozttworem asfaltu w wysokowrzacym rozpuszczalniku organicznym. Rozprawa doktorska. Politechnika Bialostocka, 2002.
9. Jozwiak J., Podgorski J. Statystyka od podstaw. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne. Warszawa 2001. – 549 s.
10. Коренюк А.Г., Думанова Л.С. Отличительная особенность морозостойкой коррозии // Изв. Вузов. Строительство. – № 4. – 1992. – с. 57-60.
11. Valenza J.J. and Scherer G.W., Mechanism for Salt Scaling, Jornal Am. Cerem. Soc. 89 (4), 1161-1179, 2006.
12. Copuroylu O. and Schlanden E., Experimental and Numerical Study of Frost Salf Scaling of Concrete, Proc. Int. Symp. "Brittle Matrix Composites 8", Warsaw, 2006, 387-397.
13. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Исследование зависимостей. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 487 с.
14. Карташов Г.Д. Предварительные исследования в теории форсированных испытаний // В помощь слушателям семинара по надежности и прогрессивным методам контроля качества промышленных изделий. – М., 1980. – с. 62-104.
15. Lazniewska B. Teoretyczna i praktyczna wartose parametrow struktury porowatosci mrozoodpornego SCC. Mat. Konf. "Krynica 2007", T. 3. S. 111-118.

Материал поступил в редакцию 08.10.08

#### NIKITIN V.I., BACKIEL-BIZOZOWSKA B. Evaluation of Concrete Frost Resistance on the Basis of Critical Level of Cumulated Damages

Frost resistance of building materials is considered as the main indicator of their durability. The analysis of degradation process of building materials subjected to cyclic freezing and thawing showed that the damages development in time runs according to two stages. The first stage is characterized by slower damages cumulation process and longer duration in comparison with the second stage. It was shown the time of passage the material degradation process from the first stage to the second one assigns the critical level of damages cumulation, which can be assumed for evaluation of material frost resistance. The methods of this criterion determination were proposed.

УДК 691.328:620.191.3

Чернякевич О.Ю., Леонович С.Н.

### УРАВНЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ДЕПАССИВАЦИИ АРМАТУРЫ С ЧАСТНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

**Введение.** На сегодняшний день широкое распространение получили вероятностные методы расчетов. При обследовании существующих конструкций вероятностные методы расчетов открывают обширные возможности для инженеров благодаря гибкости расчетных методик, способных учитывать изменения условий эксплуатации конструкций или предъявляемых к ним требований [1].

Метод частных коэффициентов для коррозии карбонизации в бетоне без трещин, представленный в этой статье, основывается на полном вероятностном методе коррозии карбонизации. Метод частных коэффициентов разделяет влияние погрешностей и изменчивостей, возникающих по различным причинам, посредством установления расчетных величин для базисных переменных [параграф 9 п.9.1 в [2].

Правила метода частного коэффициента приведены в [3].

Метод частного коэффициента используется для расчета долговечности при коррозии карбонизации в бетоне без трещин.

Чтобы определить частный коэффициент надежности по СТБ ISO 2394-2007, должны быть определены базисные переменные. Влияние базисных переменных на расчет надежности для коррозии карбонизации учитывается соответствующим значением  $\alpha_i$  для значений, рассчитанных по предельному состоянию депассивации из-за карбонизации.

Элемент конструкции отвечает требованиям долговечности для

коррозии карбонизации, если выполняется следующее уравнение по предельному состоянию (1), подробно описанному в [4]:

$$a_d - x_{c,d(t_{SL})} \geq 0, \quad (1)$$

$$x_{c,d(t_{SL})} = \sqrt{2 \cdot k_{e,d} \cdot k_{c,d} \cdot (k_{t,d} \cdot R_{ACC,0,k}^{-1} \cdot \gamma_R + \varepsilon_{t,d}) \cdot C_{s,d} \cdot \sqrt{t_{SL}} \cdot W(t_{SL})}, \quad (2)$$

где  $x_{c,d(t_{SL})}$  – расчетное значение глубины карбонизации за время  $t_{SL}$  (мм);

$k_{e,d}$  – расчетное значение функции окружающей среды (-);

$t_{SL}$  – проектный срок эксплуатации (год);

$$a_d = \text{nom } a - \Delta a = \text{nom } c - \Delta a, \quad (3)$$

где  $a_d$  – расчетное значение защитного слоя бетона (мм);

$\Delta a$  – запас защитного слоя,  $\Delta a = 10$  мм.

В уравнении (4) полного вероятностного метода для коррозии карбонизации в бетоне без трещин, подробно описанному в [5], присутствуют три регулирующих параметра:  $RH_{real}(k_e)$ ,  $a$ ,  $R_{ACC,0}^{-1}$ .

$$g(a, x_{c,i}(t)) = a - x_{c,i}(t) =$$

$$= a - \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot (k_1 \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_1) \cdot C_s \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)}. \quad (4)$$

Для этих трех параметров введены частные коэффициенты без-

Чернякевич О.Ю., преподаватель строительных дисциплин Брестского государственного технического колледжа.

Леонович С.Н., доктор технических наук, профессор Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220027, г. Минск, пр. Ф. Скорины, 65.