

## КОМПЬЮТЕРНЫЙ ПРОГНОЗ МОРОЗОСТОЙКОСТИ ПРОЕКТИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ БЕТОНОВ

*Уласевич В.П., Тимошевич В.В.*

Повреждение бетона от воздействия низких температур, так же как и коррозия - наиболее опасная причина снижения долговечности бетонных и железобетонных конструкций. Следовательно, при проектировании бетонных смесей необходимо иметь возможность теоретического прогноза их морозостойкости. Эта проблема, актуальная для бетона всегда, в настоящее время приобретает особую остроту в связи с наметившейся тенденцией глобального потепления климата, что ведет к увеличению количества циклов замораживания и оттаивания за осенне-зимне-весенний период года.

Совершенствованию методов определения морозостойкости посвящены работы многих авторов [1,..., 5].

В настоящее время испытание бетона на морозостойкость регламентированы ГОСТ 10060-87 "Бетоны. Методы контроля морозостойкости", который предусматривает испытания по *основному* и *ускоренным* методам. Основным методом испытаний основан на моделировании наиболее неблагоприятных реальных природных воздействий: попеременным замораживанием при температуре  $(-15, \dots, -20)^{\circ} \text{C}$ . Испытания *по основному методу* должны проводиться не реже одного раза в квартал, а так же при замене составляющих бетона (цемент, песок, щебень, добавки). Ускоренные *методы* допускается применять при корректировке составов бетона, для оперативного контроля качества, а так же при приемке готовых изделий.

При испытаниях по *основному методу* за *марку бетона по морозостойкости*  $F$  принимается наибольшее число циклов попеременного замораживания и оттаивания, которое выдерживают образцы установленных размеров без снижения прочности на сжатие более чем на 5% по сравнению с прочностью контрольных образцов, испытанных в эквивалентном возрасте. Число основных и контрольных образцов, а так же количество циклов должны соответствовать указанным в табл. 1. ГОСТ 10060-87. Продолжительность одного замораживания при установившейся температуре  $\leq -15^{\circ} \text{C}$  зависит от размера образцов и длится от 4 до 6 час. Легко видеть, что при необходимости подтвердить бетон марки  $F1000$  время испытаний может длиться годами, так как в случае неудачи, затраты времени на испытания удваиваются и утраиваются. В результате - полученные данные испытаний могут быть просто лишены смысла. Слабым местом ГОСТ 10060-87 следует считать требование снижения прочности  $\leq 5\%$ , так как в нем заложено противоречие: *число циклов оценивается снижением прочности*, которая для морозостойкости выступает косвенным

показателем. При этом естественно предполагается, что во-первых, образцы до испытаний идеально идентичны, во вторых - снижение прочности произошло исключительно по причине их замораживания-оттаивания.

Предлагаемые ГОСТ 10060-87 ускоренные методы определения морозостойкости также трудоемки и возможны только при наличии заранее подготовленных физических образцов. Кроме того, они требуют увязки с *основным*, на котором построены все нормативные и проектные требования по морозостойкости бетона. Как показали исследования, такая увязка через переходные коэффициенты не имеет достаточного статистического обоснования [3].

Таким образом, методы испытания бетона на морозостойкость - трудоемкое, энергоемкое и длительное испытание, и даже *основной метод* испытаний, принятый в ГОСТ не лишен недостатков. Кроме заранее заготовленной серии образцов, они требуют так же дорогостоящего холодильного оборудования, достаточно длительны во времени. Таким образом, ГОСТ 10060-87 следует признать не лишенным существенных недостатков, а заложенные в нем методы оценки морозостойкости требуют дальнейшей доработки. Существенным недостатком следует признать и то, что в нем *отсутствует методика прогноза морозостойкости бетона на стадии его проектирования*.

Впервые ускоренный метод определения морозостойкости, не требующий экспериментальных данных, предложен в работе [2]. Согласно ему марку бетона по морозостойкости  $F$  предложено находить по коэффициенту морозостойкости бетона  $K_f$ . Формулу для  $K_f$  после некоторых преобразований представим в следующем виде:

$$K_f = \frac{0.0041nЦ}{0.09\left(\left(1 - 0.23nЦ\right) + \left(1 - K_v\right)1000\right) - 0.0041nЦ}, \quad (4.1)$$

где  $n$  - экспериментальный коэффициент,  $n=0.7$ ;  $K_v$  - коэффициент уплотнения бетона,  $K_v=0.98...0.99$ ;  $Ц$  - расход цемента.

Формула (4.1) построена на учете условно *замкнутой* и *интегральной* пористости. Недостатком формулы (4.1) согласно [4] следует считать наличие эмпирических коэффициентов и сложность подсчета. Последнее при построении компьютерной модели не существенно. Другое дело, что она не учитывает влияние прямых факторов, от которых зависит морозостойкость: капиллярную пористость,  $B$ ,  $Ц$ , влияние добавок в бетон, влияние количества минералогических составляющих  $C_3A$ ,  $C_3S$  в цементе и др. Достоинство формулы (4.1) состоит в возможности формализовать подсчет при разработке компьютерной программы.

В [4], на основе исследований [1], морозостойкость предложено подсчитывать по формуле

$$F = A_f R_u (Ц / B - 0.5), \quad (4.2)$$

где:  $Ц / B$  - цементно-водное отношение;

$A_f$  - функция, зависящая от качества материалов и бетона;

$R_u$  - марка цемента.

Формула (4.2) достаточно точна, но при определении функции  $A_f$  ориентирована на ручной счет с помощью специально разработанных номограмм, что делает ее совершенно неприемлемой при алгоритмизации вычислений на компьютере. Кроме того, она не учитывает вид бетона и влияние модификаторов бетонной смеси.

Первый из указанных недостатков нами разрешен путем построения функциональных зависимостей от каждого из параметров номограмм для уточнения функции  $A_f$  [4].

Второй - предложено учитывать умножением (4.3) на коэффициент вида бетона  $C_b$  в зависимости от вида бетона, марки по средней плотности легкого бетона, применения добавки в бетон. Исследования поровой структуры тяжелого бетона с добавкой РСУ показали, что показатель однородности пор по размерам увеличивается на 15,...,30%, а показатель среднего их размера снижается на 45,...,55% [6]. В керамзитобетоне класса В15 со средней плотностью D1700, модифицированном добавкой РСУ, капиллярная пористость снижается на 15....,25%, структура бетона становится более мелкодисперсной и однородной, водопоглощение снижается на (25,...,30)%. Коэффициент вида бетона  $C_b$  предложено принимать: для тяжелого бетона  $0.95 \leq C_b \leq 1.15$ , для легкого -  $0.75 \leq C_b \leq 0.95$ . С учетом вышесказанного функция  $A_f$  имеет вид:

$$A_f = C_b \cdot [f(B / Ц, НКЩ, M_k, C_3A, D_{min}, Ж / ОК)], \quad (4.3)$$

где: НКЩ - нормированная крупность щебня;

$M_k$  - модуль крупности песка;

$C_3A$  - количество алита в цементе, %;

$D_{min}$  - количество минеральных добавок в цементе, %;

$C_b$  - коэффициент вида бетона;

Важнейшее значение для оценки конструктивных бетонов имеет критическое содержание цемента  $Ц_{kr}$ , а так же предельная величина  $B / Ц$  как факторов, сильно влияющих на капиллярную пористость. Поэтому, если на бетон накладывается требование на морозостойкость, то критическое содержание цемента  $Ц_{kr}$ , и предельная величина  $B / Ц$  должны учитываться.

Критическое содержание цемента  $Ц_{kr}$  предлагается определять по формуле [5]

$$Ц_{kr} \geq \begin{cases} \frac{\gamma \cdot \sum P \cdot c}{0.43\alpha \cdot C_3S \cdot 0.11\beta \cdot C_2S} \\ \frac{\gamma \sum P \cdot c}{0.43\alpha \cdot C_3S} \quad \text{при } C_2S < 25\% \end{cases} \quad (4.4)$$

где  $\gamma$  - коэффициент запаса,  $\gamma = 1.25$ ;

$P$  - содержание песка и пыли, кг/м<sup>3</sup>;

$c$  - количество СаО, мг, которое может быть связано 1 кг

заполнителя, определяемое по табл. 4.1;  
 $\alpha, \beta$  - степень гидратации:  $\alpha=0.8, \beta=0.6$ .

Таблица 4.1

Группа заполнителей	Характеристика гидравлической активности	Количество $CaO$ , мг, связанное 1 кг заполнителя в процессе ТВО
I	Неактивные	до 25
II	Слабоактивные	до 50
III	Среднеактивные	до 100
IV	Сильноактивные	> 100

Предельное значение  $B/C$  предложено ограничить величиной  $B/C \leq 0.6$ .  
 Применение порообразующей добавки в бетон дает возможность повысить предельное значение до  $B/C \leq 0.7$ .

На основе анализа ускоренных методов определения морозостойкости, не требующих экспериментальных данных, при построении концептуальной модели компьютерного прогноза морозостойкости использован интегрированный подход, учитывающий достоинство рассмотренных выше методик с учетом критического расхода цемента и ограничений на максимальную величину  $B/C$ , а так же влияния добавок в бетон.

Таким образом, предлагаемая компьютерная модель позволяет уже на стадии проектирования составов бетонных смесей с достаточной степенью точности прогнозировать морозостойкость бетона. Учитывая данные [4], а так же сравнения прогнозных и собственных экспериментальных исследований [6], можно предполагать, что ошибка спрогнозированной по предложенной модели морозостойкости не превысит 5,...,7%.

Предложенная компьютерная модель прогноза морозостойкости бетона реализована в блоке корректировки технологической линии проектирования (ТЛП) бетонных смесей *BETON*.

По мере накопления в базе данных ТЛП *BETON* информации о результатах теоретических и экспериментальных данных, будут получены обоснованные статистические данные для уточнения отдельных параметров компьютерной модели с целью ее совершенствования.

При достаточной экспериментальной проверке предложенной компьютерной модели полученные значения могут быть приравнены к испытаниям на морозостойкость по ускоренным методам ГОСТ 10060-87 при проектировании составов бетонных смесей.

## Литература

1. Сизов В.П. Об испытаниях бетона на морозостойкость //Бетон и железобетон. - 1979. № 10. - с. 34.
2. Шейкин А.Е. Прогнозирование морозостойкости бетона при выборе его состава //Бетон и железобетон. - 1979. № 11. - с. 25-26.
3. Подвальный А.М. Об испытаниях бетона на морозостойкость //Бетон и железобетон. - 1996. № 4. - с. 26-29.
4. Сизов В.П. Прогнозирование морозостойкости бетона //Бетон и железобетон. - 1992. № 6. - с. 25-27.
5. Горчаков Г.И., Степанова В.Ф. Долговечность легких бетонов и конструкций, изготовленных с использованием отходов промышленности //Бетон и железобетон. - 1985. № 7 - с. 13-14.
6. Уласевич В.П., Уласевич З.Н. Конструкционный бетон с добавкой РСУ. - Брест, ООО FORT, 1997. - 65 с.

## К ПОСТРОЕНИЮ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОТЫ СТЫКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СБОРНО- МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Тур В.В., Шалобыта Т.П., Шалобыта Н.Н.*

В работе [ 1 ] показано, что для составных конструкций ,у которых наблюдается нелинейное поведение не только составляющих стержней, но и связей по контакту, приращение сдвига на длине шва  $dx$  может быть выражено из закона плоских сечений:

$$d\delta_i = (\varepsilon_i^0 + \psi_{-i} - \varepsilon_{i+1}^0 + \psi_{i+1})dx = (\varepsilon_i^0 - \varepsilon_{i+1}^0 + \psi_i)dx$$

$$\text{или преобразуя с учетом } \frac{d\delta_i}{dx} = \left(\frac{d\tau_i}{d\delta_i}\right)^{-1} \left(\frac{d\tau_i}{dx}\right),$$

$$\text{получим: } \frac{d\tau_i}{dx} = (\varepsilon_i^0 - \varepsilon_{i+1}^0 + v_i\psi)d\delta_i, i = 1, 2, \dots, 4$$

$i$ - количество швов.

Составляя соответствующие условия равновесия может быть получена система уравнений из решения которой определятся продольные деформации составляющих стержней  $\varepsilon_i^0, \varepsilon_{i+1}^0$  и кривизна составного сечения  $\psi$  . .

В месте с тем, для решения системы уравнений необходимо иметь адекватную зависимость , связывающую касательные напряжения в стыке с его перемещениям  $(d\tau_i - d\delta_i)$  для соответствующего типа контакта.