

Данная методика разработана в предположении того, что скорость коррозии остается неизменной на всем протяжении процесса.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vesikari E. (1994) Durability design of concrete structures with respect to frost attack: Proceedings of the Fourth International Symposium on Cold Region Development, 13-16 June. Association of Finnish Civil Engineers RIL, 2 pp.
2. Pihlajavaara S.E. (1994) Contributions for the development of the estimation of long-term performance and service life of concrete. Helsinki University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Surveying, Espoo, Report 3, 26 pp.
3. Srivastava K.N., Kumar M. A note on the problem of edge crack in a semi-circular plate // Int. J. Fract. – 1976. – 12, N4. – p.645-646.
4. Matala S. (1991) Service life model for frost resistance of concrete based on properties of fresh concrete, Nordisk Vagtekniska Forbundet, Broseminarium, Korsar, Denmark, 18 pp.
5. Vesikari E. (1995) Betonirakenteiden kayttoikamitoitus (Service life design of concrete structures). Association of Finnish Civil Engineers RIL, Helsinki. RIL 183-4.9/ (In Finnish, 120 pp.)
6. Petersson P.E. Fracture Energy of Concrete: Practical Performance and Experimental Results// Cement and Concrete research. –10, 1980. –p.91-101.
7. Strange P.C., Bryant A.H. Experimental Tests on Concrete Fracture// Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE. –105, 1979. –pp.334-343.
8. Wittmann F.H., Rokudo K., Bruhwiler E., Mihashi H., Simonin F. Fracture energy and Softening of Concrete as Determined by Means of compact tension specimens// Materials and Structures, ol. 21, 1988. –pp.21-32.
9. Wittmann F.H., Zaitsev Yu.V. Verformung und Bruchvorgang poroser Baustoffe bei kurzzeitiger Belastung und unter Dauerlast. Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton, H, 232; West-Berlin, 1977. –24p.
10. Lott J.L., Kesler C.E. Crack Propagation in Plain Concrete, in Simposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete// Special report 90, Highway Research Board. –Washington, D.C., 1996. –p. 204-218.
11. Mindess S. The application of Fracture Mechanics to Cement and Concrete: a Historical Review// In: Fracture Mechanics of Concrete. –Amsterdam, Elsevier, 1983. –p.1-30.
12. Moavenzaden F., Kuguel R. Fracture of Concrete// Journal of Matherials. –4, 1969. –p.497-519.
13. Alford N. MCN., Poole A.B. The Effect of Shape and Surface Texture on the Fracture Toughness of Mortars.// Cement and Concrete Research. –9. –1979. –P. 583-589.
14. Bazant Z.P. Mechanics of distributed cracking// Applied Mechanics Reviews, ASME, Vol. 39, №5, 1984. – pp 675-705.
15. Bentur A., Mindess S., Banthia N. The behaviour of concrete under impact loading exptirmental procedures and method of analysis// RILEM Materials and structures 19, № 113, 1986. – pp 371-378.

УДК 666.97.017

*Полейко Н.Л., Ковшар С.Н., Осос Р.Ф., Полейко Д.Н.*

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ БЕТОНА ОТ ДЕЙСТВИЯ ПОПЕРЕМЕННОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ

В настоящее время не существует общего мнения относительно разработки моделей долговечности бетона при действии попеременного замораживания и оттаивания. Модели в основном предназначены для использования при проектировании на долговечность с коэффициентами безопасности. Однако следует отметить, что используемые модели не всегда в полной мере отражают факторы, влияющие на долговечности бетона, что выражается в различных формах разрушения бетона при попеременном замораживании и оттаивании.

Под воздействием попеременного замораживания и оттаивания имеется в виду постепенное разрушение бетона с поверхности. В данных условиях происходит постепенное уменьшение прочности бетона, и, как следствие, происходит окончательное разрушение бетона с поверхности.

Скорость разрушения бетона при попеременном замораживании и оттаивании в первую очередь определяется условиями воздействия окружающей среды. Коррозионное воздействие на бетон усиливается при применении солей-электролитов, в частности, при использовании хлористых солей они способствуют, наряду с попеременным замораживанием и оттаиванием, развитию физической коррозии бетона.

Основными причинами разрушения бетона при попеременном замораживании и оттаивании является 9%-ое увеличение в объеме воды при замораживании, возникновение давления от растущих

кристаллов льда в капиллярно-пористой структуре материала, расклинивающее действие воды, температурные деформации составляющих бетона.

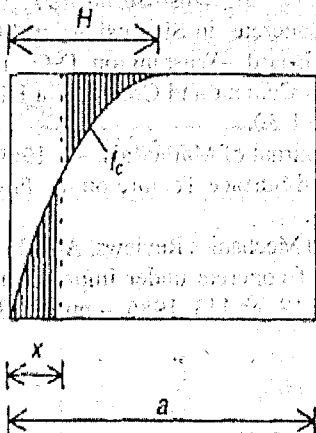
Морозостойкость – это свойство материала противостоять попеременному замораживанию и оттаиванию. Помимо структурных характеристик бетона, на морозостойкость оказывают влияние также условия воздействия окружающей среды. Разрушающее действие окружающей среды усиливается при воздействии на бетон растворов солей. Типичной картиной механизма разрушения от совместного воздействия соли и мороза является постепенное отслаивание и шелушение поверхности бетона.

Полное разрушение от попеременного замораживания-оттаивания является результатом уменьшения прочности бетона конструкции с поверхности, которое с увеличением количества циклов приводит к полному разрушению. Уравнение (1) показывает модель разрушения бетона при попеременном замораживании и оттаивании:

$$f_{ck}(d) = f_{ck} [1 - [1 - (d/H)^n]] \quad (1)$$

где  $f_{ck}(d)$  – характерная прочность на сжатие бетона на глубине  $d$ ;  
 $f_{ck}$  – характерная прочность на сжатие неразрушенного бетона,  
 $d$  – глубина от поверхности,  
 $H$  – глубина разрушения,  
 $n$  – количество циклов (или время) замораживания и оттаивания.

При выполнении расчетов уменьшение прочности бетона с поверхности можно представить как уменьшение прочности конструкции за счет уменьшения исходных размеров. Данный метод реализуется путем введения понятия явной потери бетона.



$$f_c = f_{ck} (1 - (1 - \frac{d}{H})^n)$$

$$N = f_{ck} (a - x)$$

$$x = H / (n + 1)$$

Рисунок 1 – Определение явной потери бетона.

Рис. 1 показывает уменьшение прочности, согласно уравнению (1), в пределах глубины воздействия,  $H$ . Величина индекса  $n$  уменьшается от бесконечности (в момент  $t=0$ ) до 0 (после бесконечно длительного времени). Величину  $x$  можно вычесть из ширины конструкции  $a$ , чтобы получить ту же самую величину для конструкции с неразрушенным бетоном. Таким образом, даже если не происходит реальное ослабление бетона, разрушение можно принять в расчет, уменьшая размеры конструкции при явной потере бетона. Явной потерей является глубина разрушения, деленная на величину  $n+1$ , соотношенную со временем.

Конечно же, реальное разрушение бетона определяется в первую очередь условиями эксплуатации. В общем случае потерю структурно-эффективного бетона можно представить как функцию времени и описать линейной моделью (2) [1].

$$r = c_{env} c_{cur} c_{age} a^{-0.7} (f_{ck} + 1)^{-1.4} \quad (2)$$

$$s = rt \quad (3)$$

где  $r$  – скорость разрушения; мм/год;

$c_{env}$  – коэффициент, зависящий от условий окружающей среды;

$c_{cur}$  – коэффициент, зависящий от возраста бетона;

$c_{age}$  – коэффициент, зависящий от состава вяжущего;

$c_{env}$  – содержание вовлеченного воздуха в бетонной смеси, %;

$f_{ck}$  – средняя прочность на сжатие бетона;

$s$  – потеря структурно-эффективного бетона.

Данная формула пригодна для бетонов низких и средних классов по прочности на сжатие. Для высокопрочных в настоящее время проводятся дополнительные исследования, поскольку, как было установлено, возможно появление значительных внутренних напряжений в материале, что приводит к преждевременному разрушению материала.

Коэффициент, зависящий от возраста бетона, предложено определять по формуле:

$$c_{cur} = 1 / (0.85 + 0.17 \log_{10}(d)) \quad (4)$$

где  $d$  – возраст бетона, дни.

Коэффициент, зависящий от состава вяжущего, предложено определять по формуле:

$$c_{age} = 1 / (1 - 0.045 p_{sf} - 0.008 p_{sl} - 0.001 p_{fl}) \quad (5)$$

где  $p_{sf}$  – содержание кремнезема, % от общей массы вяжущего;

$p_{sl}$  – содержание доменного шлака, % от общей массы вяжущего;

$p_{fl}$  – содержание золы-уноса, % от общей массы вяжущего.

Коэффициент окружающей среды ( $c_{env}$ ) определяют по таблице 1 в зависимости от условий эксплуатации.

Таблица 1 – Классификация условий и величин коэффициента окружающей среды

Класс	Условия	$c_{env}$
1	<b>Очень сильные</b> большое количество циклов замораживания-оттаивания, наличие солей и солей-антиобледенителей, значительные колебания температур и влажности	80 – 160
2	<b>Сильные</b> Большое количество циклов замораживания-оттаивания, постоянное увлажнение конструкций (без хлоридов), значительные колебания температуры и влажности	40 – 80
3	<b>Умеренные</b> Конструкции на открытом воздухе, периодическое замораживание-оттаивание, умеренные перепады температуры и влажности	20 – 40
4	<b>Благоприятные</b> замораживание и оттаивание отсутствует	<20

Под повреждением поверхности бетонных конструкций мы имеем в виду различные типы механизмов выветривания в условиях на открытом воздухе, исключая повреждение от мороза, которое моделируется отдельно. Они включают колебания температуры и влажности, процесс выщелачивания и физическую солевую коррозию бетона.

Ежедневные температурные перепады, особенно на поверхностях, открытых солнечному свету, вызывают постепенное разрушение поверхностного слоя. Периодическое увлажнение и высыхание с климатическими изменениями влажности также вызывают постепенное образование трещин на поверхности бетонных конструкций. Как отмечается, данные разрушения вызваны главным образом несовместимостью температурных деформаций цементного камня и заполнителя в бетоне.

При постоянном воздействии воды на бетон возможна коррозия выщелачивания. Наличие агрессивных солей обуславливает разнообразные механизмы коррозии, связанные с кристаллизацией солей в порах бетона. Эти механизмы обычно включают капиллярный подсос соленой воды из почвы или моря, за которым следует выпадение в осадок кристаллов соли в поры и полости при испарении. Данный механизм представляется как расширение и сжатие кристаллов соли в результате гидратации и дегидратации, и которые, в конечном счете, ведут к разрушению бетона.

Понятие явной потери бетона, которое было введено ранее, также может быть применимо для описания модели разрушения поверхности бетонной конструкции. Это означает, что разрушение бетона по поверхности конструкции принимается в расчет как соответствующая явная потеря бетона. Уменьшение несущей способности конструкции оценивается по потере эффективной площади поперечного сечения бетона, а не от снижения прочности бетона в конструкции.

Отмечено, что проницаемость бетона напрямую связана с долговечностью конструкций. Скорость проникновения воды и растворенных вредных веществ зависит от проницаемости, а также от скорости процесса выщелачивания из бетона. Проницаемость бетона связана с его прочностью на

сжатие. Считают, что для бетонов средней или высокой прочности (30 – 100 МПа) скорость разрушения (потеря структурно-эффективного бетона) является постоянной и обратно-пропорциональна прочности на сжатие. Увеличение прочности бетона в два раза уменьшает скорость потери бетона до одной десятой. Для расчета скорости разрушения предложено уравнение (6) [2].

$$r = c_{env} c_{cur} f_{ck}^{-3.3}, \quad (6)$$

где  $r$  – скорость разрушения (потеря структурно-эффективного бетона, мм/год);

$c_{env}$  – коэффициент, зависящий от условий окружающей среды;

$c_{cur}$  – коэффициент, зависящий от возраста бетона;

$f_{ck}$  – средняя прочность на сжатие бетона.

Коэффициент, зависящий от условий окружающей среды, предложено определять по табл. 2.

Таблица 2 – Классификация условий и величин коэффициента окружающей среды

Класс	Условия	Величина коэффициента окружающей среды
1	<b>Очень сильные</b> морские конструкции или конструкции в пределах капиллярного подъема соленой грунтовой воды, высокие колебания температур и влажности	100 000 – 500 000
2	<b>Сильные</b> морские конструкции или конструкции в пределах капиллярного подъема соленой грунтовой воды, колебания температур и влажности	10 000 – 100 000
3	<b>Нормальные</b> нормальные внешние условия, незначительные изменения температур и влажности	1000 – 10 000
4	<b>Благоприятные</b> Сухие условия, без доступа солнечного света	<1000

Скорость разрушения в первую очередь определяется условиями окружающей среды. Показано, что долговечность бетона может колебаться от 10 до 10 000 000 лет, в зависимости от условий, в которых эксплуатируется конструкция.

Формула для коэффициента, зависящего от возраста бетона, аналогична уравнению 4.

Для конструкций, эксплуатирующихся в гидротехнических сооружениях, характерно разрушение бетона не только от действия попеременного замораживания – оттаивания, агрессивных веществ растворенных в воде, а также за счет разрушения поверхности, находящейся в контакте со льдом. Механизм разрушения обусловлен механическим износом поверхностного слоя бетона за счет воздействия пластов льда при движении. Разрушение может быть вызвано тремя причинами: механическим износом цементного камня, механическим износом заполнителя, а также разрушением бетона при низкой прочности сцепления заполнителя с цементным камнем. Скорость механического износа под действием льда предложено определять по следующей зависимости [5]:

$$b = \frac{3}{f_{ck} \cdot s}, \quad (7)$$

где  $f_{ck}$  – прочность бетона на сжатие,  $s$  – скорость движения льда у поверхности.

Общую глубину механического износа предложено определять по следующей зависимости [4]:

$$ABR = \sum a_i \log_n s / \log_n R_i + (1 - \sum a_i) b, \quad (8)$$

где  $a_i$  – содержание заполнителя в бетоне определенной крупности;

$n_s$  – число ударов льда о поверхность бетона при движении пласта льда;

$n_l$  – число ударов, необходимое для разрушения контактной зоны между заполнителем и цементным камнем.

В случае совместного воздействия попеременного замораживания и оттаивания и механического износа под действием льда глубину разрушения предложено оценивать по следующей зависимости [4]:

$$ABR = 1 / (1 - \sum a_i) 3 / f_{ck} s \quad (9)$$

Рассмотренные модели разрушения бетона могут быть использованы для разработки общей модели разрушения капиллярно-пористых тел при попеременном замораживании и оттаивании, а также при моделировании процессов физической формы коррозии при воздействии солей хлоридов.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vesikari E. (1994) Durability design of concrete structures with respect to frost attack. Proceedings of the Fourth International Symposium on Cold Region Development. 13-16 June. Association of Finnish Civil Engineers RIL, 2 pp.
1. Pihlajavaara S.E. (1994) Contributions for the development of the estimation of long-term performance and service life of concrete. Helsinki University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Surveying, Espoo, Report 3, 26 pp.
2. Srivastava K.N., Kumar M. A note on the problem of edge crack in a semi-circular plate // Int. J. Fract. – 1976. – 12, N4. – p.645-646.
3. Matala S. (1991) Service life model for frost resistance of concrete based on properties of fresh concrete, Nordisk Vagtekniska Forbundet, Broseminarium, Korsar, Denmark, 18 pp.
4. Vesikari E. (1995) Betonirakenteiden kayttoikamitoitus (Service life design of concrete structures). Association of Finnish Civil Engineers RIL, Helsinki. RIL 183-4.9/ (In Finnish, 120 pp.)

УДК 691.332:628.1

Прасол А.В.

### ИССЛЕДОВАНИЕ МАССОПЕРЕДАЧИ ВОДЫ И ХЛОРИДНЫХ РАСТВОРОВ В БЕТОНЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Цементный камень в бетоне относится к капиллярно-пористому гидрофильному материалу, способному не только адсорбировать влагу и газы из воздуха, но и легко поглощать, когда избыток воды или солевого раствора попадает на поверхность железобетонной конструкции, а в бетоне определенная часть пор не содержит влаги. В таких условиях массоперенос не должен подчиняться законам Фика. Поэтому представлялось интересным изучить массопередачу жидкой среды с помощью электрохимических методов, сочетая их с гравиметрическими.

Для изготовления образцов использовали портландцемент 500 Костюковичского завода с активностью  $320 \text{ кг/см}^2$ . В качестве заполнителей служили щебень гранитный фракции 5-10 и карьерный песок. Из бетона изготавливали балочки размером  $4 \times 4 \times 7 \text{ см}$ , в которые по центру заделывали стальные электроды размером  $1 \times 1 \times 1 \text{ см}$  из стали Ст3. К электродам припаивали токоотводы с полихлорвиниловой изоляцией. Места пайки и четыре грани кубов изолировали отвержденной эпоксидной смолой. Электроды заделывали в бетон таким образом, чтобы толщина защитного слоя составляла 15 мм.

Образцы были изготовлены из бетона следующего состава: 1:0,9:2,4 с В/Ц=0,5, где цемент: песок: щебень с В/Ц – водоцементное соотношение.

Для изучения кинетики массопереноса использовали воду и 3% раствор NaCl, который применяется в качестве антиобледенительного средства в песчано-сильвийных смесях.

Образцы после распалубки помещали в эксикатор с дистиллированной водой, где они находились 28 суток для набора прочности и окончания процесса гидратации.

Изучение кинетики массопереноса осуществляли, измеряя водопоглощение весовым методом для образцов, которые не содержали электродов и падение сопротивления образцов с электродами, помещенных в дистиллированную и 3% раствор NaCl.

Определение изменения массы осуществляли на весах ВЛК-500, позволяющих фиксировать вес с точностью  $\pm 2 \text{ мг}$ . Для образцов с электродами параллельно со взвешиванием определяли электрическое сопротивление бетона и его изменение во времени, а также потенциал стального электрода, имитировавшего стальную арматуру.

Сопротивления измеряли с помощью цифрового измерителя С. L. R. марки E7-8 в автоматическом режиме поиска при частоте тока 1000 Гц. Потенциалы измерялись при помощи иономера универсального ЭВ-74.

Электропроводность бетона зависит в основном от ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{OH}^-$ , а количество жидкой фазы и структура порового пространства определяет величину ( $R_6$ ) критического сопротивления бетона [1]. Это позволило определить пористость бетона ( $P_6$ ) и изучить кинетику водонасыщения пор по скорости изменения  $R_6$  и параллельно весовым методом.