

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССОВ КОРРОЗИИ КОНСТРУКЦИОННОГО БЕТОНА АЭС И ИХ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Докт. техн. наук, проф. ЛЕОНОВИЧ С. Н.

Белорусский национальный технический университет

Железобетонные конструкции применяются в качестве несущих и ограждающих элементов в зданиях, сооружениях и технологических агрегатах атомных электростанций (АЭС) в условиях контакта бетона с химическими веществами в газовом, жидком и твердом состояниях. В зависимости от вещественного состава химические вещества обладают различной степенью активности к бетону. По этому признаку и результатам взаимодействия (изменение свойств бетона и размеров сечения элементов) химически активная среда может рассматриваться как коррозионная нагрузка.

Количественные параметры химических веществ, влияющих на свойства эксплуатационного состояния бетона, режимы их действия систематизированы и изложены в строительных нормах и правилах. Коррозионная нагрузка систематизирована качественно (слабо-, средне- и сильноагрессивные среды) и количественно в показателях концентрации химически активных веществ. Актуальна проблема математического моделирования коррозионных процессов конструкционного бетона АЭС.

Основные закономерности коррозии конструкционного бетона АЭС. По классификации В. М. Москвина, химически активная внешняя среда может способствовать развитию в бетоне трех видов коррозии.

Коррозия 1-го вида. Интенсивность понижения прочности цементного камня вследствие развития процессов коррозии 1-го вида: растворение и вынос из структуры гидроксида кальция определены условиями контакта воды и цементного камня. Важными определяющими факторами процесса являются проницаемость структуры и состав воды. Растворимость гид-

роксида кальция зависит и от температуры, с ее повышением от 273 до 353 К понижается в два раза: с 1,3 до 0,66 г/л СаО.

Гидроксиды и гидроалюминаты растворяются с их разложением. Последовательность перехода зависит от концентрации гидроксида кальция в растворе. Растворение и вынос из цементного камня гидроксида кальция проявляются в понижении его прочности. Так, в цементно-песчаном растворе состава 1:3 при В/Ц = 0,5 и выщелачивании 10 % гидроксида кальция в пересчете на СаО прочность на сжатие понизилась на 10 %, а при выщелачивании 25 % – на 60 %. В бетоне прочностные свойства при развитии процессов коррозии 1-го вида изменяются с меньшей скоростью.

При выщелачивании СаО более 23–25 % происходит резкое понижение прочности бетона (рис. 1а, б).

Проф. Ф. М. Иванов предложил расчетный подход к оценке процесса для бетона, стойкого в условиях коррозии 1-го вида, по заданной структурной характеристике – коэффициенту фильтрации K [1]

$$\tau = K Q_{\text{ц}} \alpha / C_{\text{СаО}} Q_{\text{Н}_2\text{О}}^{\Phi}, \quad (1)$$

где $K = Q_{\text{СаО}} / Q_{\text{СаО}}^0$, % (рис. 1); $Q_{\text{ц}}$ – количество цемента в бетоне (300–500 кг/м³); Q^{Φ} – количество профильтровавшей воды в единицу времени, см³/(см³·с); $Q_{\text{СаО}}$, $Q_{\text{СаО}}^0$ – соответственно количество СаО в бетоне в момент времени τ и в начале эксплуатации; $\alpha = 0,65$; $C_{\text{СаО}} = 1,2$ г/л.

Коррозия 2-го вида. Обменные химические реакции между кислотами и компонентами цементного камня наиболее интенсивно протекают в жидкой среде, особенно в условиях высо-

ких концентраций $pH < 3$. Результатом химического процесса являются новообразования, не обладающие прочностью. Воздействия среды, агрессивной по признакам коррозии 2-го вида, проявляются в полном разрушении слоя бетона на глубине фронта развития процесса нейтрализации поступающей кислоты [1, 2]. За фронтом разрушения (примерно 1–3 размера заполнителя) процесс продолжается с диффузионным ограничением D^* .

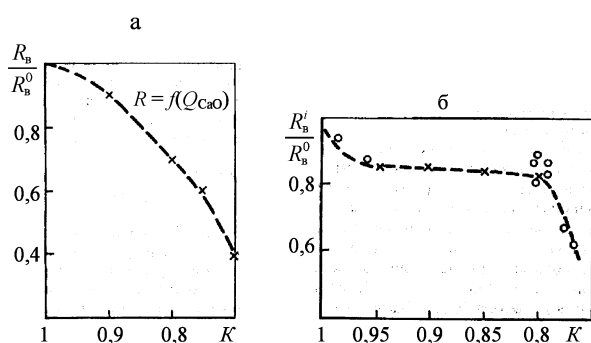


Рис. 1. Снижение прочности: а – цементно-песчаного раствора (1:3, В/Ц = 0,5) при фильтрации талой воды $pH = 6,5$; б – бетона (В/Ц = 0,65) [1, 2]

По экспериментальным данным получена эмпирическая зависимость для расчета глубины разрушенного слоя бетона $\delta(t)$ за цикл времени действия кислоты

$$\delta(t) = [2D^*C_0\Xi(1/\rho_c + w/c/\rho_w t/Q)]^{0,5}, \quad (2)$$

где D^* – диффузионное ограничение; C_0 – концентрация кислоты; Q – относительное весовое содержание СаО в цементе; ρ_c и ρ_w – плотности цемента и воды; $\Xi = \frac{mM_{CaO}}{nM_{кисл}}$ – расчетный химический эквивалент масс реакции; m , n – коэффициенты 1; 2; t – цикл времени действия кислоты; w/c – водоцементное отношение.

Прочностные и деформативные свойства бетона за фронтом коррозии изменяются незначительно.

Коррозия 3-го вида характеризуется химическими процессами растворения, взаимодействия и кристаллизации в порах и капиллярах структуры бетона малорастворимых солей, увеличивающихся в объеме. В бетоне возрастают внутренние собственные деформации и напряжения, вследствие чего появляются трещины в зонах контакта цементного камня с заполни-

телем, локальное отслоение объемов. Количественно процесс сульфатной коррозии бетона принято характеризовать объемом сульфат-ионов, связанных минералами цементного камня (рис. 2).

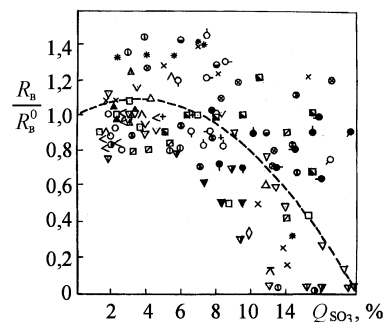


Рис. 2. Влияние накопления сульфат-ионов на относительное изменение прочности бетона при воздействии растворов Na_2SO_4 : *, $\square$, Δ и др. – экспериментальные данные; ---- – статистическая кривая [1, 2]

Установлена эмпирическая зависимость прочности бетона от количества связанных в структуре цементного камня сульфат-ионов по глубине сечения (рис. 3).

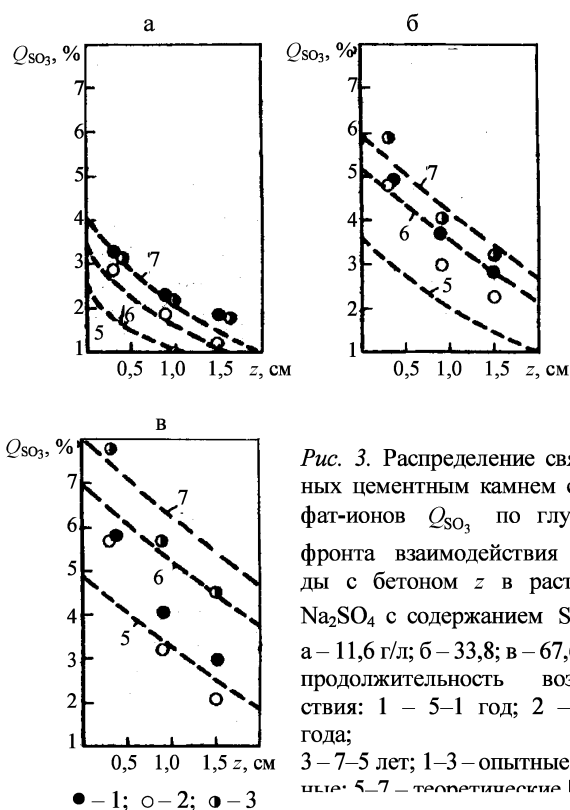


Рис. 3. Распределение связанных цементным камнем сульфат-ионов Q_{SO_3} по глубине фронта взаимодействия среды с бетоном z в растворе Na_2SO_4 с содержанием SO_4^{2-} : а – 11,6 г/л; б – 33,8; в – 67,6 г/л; продолжительность воздействия: 1 – 5–1 год; 2 – 6–3 года; 3 – 7–5 лет; 1–3 – опытные данные; 5–7 – теоретические [1, 2]

Разработаны методы расчета длительных деформаций и прочности бетона в сульфатных

растворах под нагрузкой. Методы расчета прочности и деформаций учитывают развитие процессов коррозии бетона 3-го вида в связи с характеристиками воздействий, концентрацией сульфат-ионов в грунтовых водах или растворах, их температуры, режима действия и технологическими параметрами бетона (минеральный состав бетона и его количество, пористость структуры) [1, 2].

Математическое моделирование коррозионных процессов конструкционного бетона АЭС. К настоящему времени в строительном материаловедении накоплено большое количество научных данных о коррозионных процессах, протекающих в бетонах конструкций АЭС (в том числе Бушеровской АЭС, Исламская Республика Иран) под влиянием окружающей среды того или иного состава: установлены и исследованы принципиальные схемы химических реакций; даны математические описания некоторых коррозионных процессов, основанные на использовании уравнений тепло- и массопереноса; создана система нормативных документов по борьбе с коррозией бетона в строительстве [3].

Этот большой практический материал создает предпосылки для обобщений, представления результатов в форме математических моделей, позволяющих с требуемой точностью рассчитать долговечность бетонных и железобетонных конструкций.

В общем случае для коррозии 1-го и 2-го видов диффузия гидроксида кальция в пористой структуре бетона описывается нелинейным дифференциальным уравнением массопроводности параболического типа с источником членом [4, 5]

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = \text{div} [k(x, \tau) \text{grad} C(x, \tau)] + q_m(x, \tau). \quad (3)$$

Здесь $C(x, \tau)$ – концентрация гидроксида кальция, кг СаО/кг бетона, в общем случае величина, изменяющаяся и во времени и по координате; k – коэффициент массопроводности, м²/с; $q_m(x, \tau)$ – мощность объемного источника массы вследствие химических реакций, кг СаО/(м³·с).

При отсутствии источника ($q_m(x, \tau) = 0$) уравнение (3) переходит в уравнение массопровод-

ности, которое описывает массоперенос при коррозии 1-го вида.

Одной из проблем является формулировка краевых (начальных и граничных) условий, адекватных реальной физике процесса.

На практике очень важным случаем является коррозия 1-го вида в условиях ограниченного объема жидкой среды. Решение этой задачи не замыкается только на расчете динамики профилей концентраций и средней концентрации по толщине.

Математически эта задача может быть представлена уравнением

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 C(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0; \quad 0 \leq x \leq \delta, \quad (4)$$

с начальным условием

$$C(x, \tau)|_{\tau=0} = C(x, 0) = C_0 \quad (5)$$

и граничными условиями:

- на внешней поверхности конструкции

$$\frac{\partial C(0, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (6)$$

- на внутренней поверхности

$$k \frac{\partial C(\delta, \tau)}{\partial x} = \beta [C_p(\tau) - C(\delta, \tau)]. \quad (7)$$

Отличительной особенностью коррозии 1-го вида в условиях ограниченного объема жидкой среды является не постоянство величины равновесной концентрации на поверхности твердого тела C_p , а ее зависимость от концентрации компонента в жидкой фазе

$$C_p(\tau) = f[C_{\text{ж}}(\tau)]. \quad (8)$$

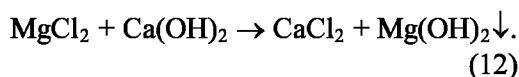
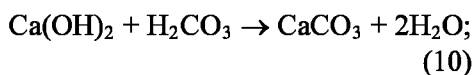
Простейшей формой этой зависимости является закон Генри

$$C_p(\tau) = m C_{\text{ж}}(\tau), \quad (9)$$

где m – константа Генри, кг жидкости/кг бетона.

Решение задачи массопереноса в процессах коррозии в условиях ограниченного объема жидкой среды представлено проф. С. В. Федосовым в [4, 5]

Коррозия 2-го вида осложнена химическими реакциями взаимодействия агрессивной окружающей среды и компонентов бетона, наиболее распространенными из которых являются углекислотная и магниальная коррозии:



Задача коррозии 2-го вида может быть решена следующим образом:

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 C(x, \tau)}{\partial x^2} + q_v(x) \quad (13)$$

с начальным условием

$$C(x, \tau)|_{\tau=0} = C(x, 0) = C_0 \quad (14)$$

и граничными условиями:

$$\frac{\partial C(0, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (15)$$

$$k \frac{\partial C(\delta, \tau)}{\partial x} = q_n. \quad (16)$$

Значение коэффициента массопроводности большинства строительных материалов, в том числе и бетонов, находится в пределах 10^{-10} – 10^{-12} м²/с. При этом выполняется условие $\text{Fo}_m \ll 0,1$. Решение задачи массопереноса в процессах коррозии при малых значениях числа Фурье приведено проф. С. В. Федосовым в [4, 5].

Решения представлены в форме рядов Фурье:

1. Профиль безразмерных концентраций переносимого компонента по толщине бетона в произвольный момент времени

$$\frac{z(\bar{x}, \text{Fo}_m)}{z_{\text{ж}}(0)} = -\frac{\text{Bi}_m}{a_2 - a_1} \sum_{i=1}^2 (-1)^i \exp \left[-a_i (1 - \bar{x}) + a_i \text{Fo}_m \right] \times \\ \times \text{erfc} \left(\frac{1 - \bar{x}}{2\sqrt{\text{Fo}_m}} - a_i \sqrt{\text{Fo}_m} \right). \quad (17)$$

2. Средняя по толщине конструкции концентрация переносимого компонента в момент

времени τ , определяемый значением критерия Fo_m :

$$z_{\text{cp}}(\text{Fo}_m) = \int_0^1 z(\bar{x}, \text{Fo}_m) d\bar{x}. \quad (18)$$

3. Концентрация переносимого компонента в жидкой фазе

$$\frac{z_{\text{ж}}(\bar{x}, \text{Fo}_m)}{z_{\text{ж}}(0)} = 1 - \frac{K_m \text{Bi}_m}{\sqrt{\text{Bi}_m^2 - 4K_m \text{Bi}_m}} \sum_{i=1}^2 (-1)^{i+1} \times \\ \times \left\{ 2\sqrt{\frac{\text{Fo}_m}{\pi}} + a_i \int_0^{\text{Fo}_m} \exp(a_i^2 \text{Fo}_m) \text{erfc}(-a_i \sqrt{\text{Fo}_m}) d\text{Fo}_m \right\},$$

где $\text{Bi}_m = \beta \frac{\delta}{k}$ – массообменный критерий Био;

$K_m = m \frac{G_{\text{бет}}}{G_{\text{ж}}}$, $G_{\text{бет}}$ и $G_{\text{ж}}$ – массы бетона и жид-

кости, кг; μ_n – корни характеристического

уравнения $\text{ctg} \mu_n = \frac{\mu_n^2 - K_m}{\mu_n \text{Bi}_m}$.

Полученные решения справедливы при постоянных значениях коэффициентов переноса (массоотдачи – β , массопроводности – k) и физико-химических характеристиках бетона и жидкости (плотность ρ) и констант фазового равновесия (Генри – m).

Для большинства практических расчетов конструкционного бетона АЭС эти допущения не несут существенного искажения физической картины процессов массопереноса и конечных результатов расчетов. Но они могут приобрести решающее значение и существенно повлиять на результат, когда хотя бы один из перечисленных параметров изменяется во времени процесса либо его значение зависит от концентрации переносимого компонента.

Поэтому следующим классом проблем является экспериментальное определение коэффициентов переноса (k , β) и учета наложения химических реакций на коэффициент диффузии. Таким образом, совместное рассмотрение комплекса проблем позволяет учитывать кинетику и динамику процессов коррозии.

ВЫВОД

Все приведенные процессы надо рассматривать совместно и при математическом модели-

ровании необходимо учитывать различные среды, состав исходного материала, что в последующем позволит прогнозировать время жизни строительных конструкций АЭС и определять методы их защиты.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванов, Ф. М.** Долговечность железобетона в агрессивных средах / Ф. М. Иванов. – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.

2. **Леонович, С. Н.** Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов в терминах силовых и энергетических критериев механики разрушения / С. Н. Леонович. – Минск, 1999. – 266 с.

3. **Dorf, V.** Durability of reinforced concrete structures under seaside tropical climate effects / V. Dorf // Durability Design and Fracture Mechanics of Concrete Structures: Proceedings of International Conference «Construction and Architecture»: Ed. by prof. B. M. Khroustaliyev, prof. S. N. Leonovich. – 2003. – P. 26–36.

4. **Моделирование** массопереноса в процессах жидкостной коррозии бетона 1 вида / С. В. Федосов [и др.] // Строительные материалы. – 2005. – № 7. – С. 60–62.

5. **Моделирование** массопереноса в процессах коррозии бетонов первого вида (малые значения числа Фурье) / С. В. Федосов [и др.] // Строительные материалы. – 2007. – № 5. – С. 68–69.

Поступила 26.06.2009

УДК 691.32

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА БЕТОНА С УЧЕТОМ ЕГО МОРОЗОСТОЙКОСТИ

Инж. КОВШАР С. Н., докт. техн. наук, проф. БАБИЦКИЙ В. В.

Белорусский национальный технический университет

В последние годы методы оптимизации составов бетона развиваются в направлении учета свойств, характеризующих его долговечность. Следует отметить, что если для традиционного бетона методов проектирования состава достаточно много, то для бетона с пластифицирующими и воздухововлекающими добавками их явно недостаточно. В связи с этим технологи на предприятиях по производству сборного и монолитного бетона лишены инструмента, позволяющего проектировать составы таких бетонов с достаточной достоверностью. В настоящей работе приведен расчетно-графический метод проектирования состава бетона, включая химические добавки, ориентированный на прогнозирование такой важной эксплуатационной характеристики, как морозостойкость.

Последовательность проектирования состава тяжелого бетона. Методика проектирования состава бетона реализуется в два этапа. На первом этапе определяют состав бетона, который обеспечивает требуемые значения удобоукладываемости бетонной смеси и прочности

бетона, а на втором – его предполагаемую морозостойкость.

По общепринятой схеме проектирование состава бетона начинают с определения водоцементного отношения бетонной смеси, которое удобно рассчитать, основываясь на формуле [1]:

$$\left(\frac{B}{C}\right)_6 = \frac{0,3k_3f_{ц}}{k_{то}f_6} + 0,1, \quad (1)$$

где k_3 – коэффициент, зависящий от качества за-
полнителей (для щебня принимают равным 1,0, а для гравия – 0,9); $f_{ц}$ – активность цемента, МПа; $k_{то}$ – коэффициент, зависящий от отпускной прочности бетона; f_6 – прочность бетона, МПа.

Величину отпускной прочности бетона учитывают следующим образом:

$$k_{то} = 1 + 0,009(f_{отп} - 70), \quad (2)$$

где $f_{отп}$ – отпускная прочность бетона, %.