

Academia. Архитектура и строительство, № 2, стр. 182–189.

Academia. Architecture and Construction, no. 2, pp. 182–189.

Исследования и теория

Научная статья

УДК 691-32:51-7

DOI: 10.22337/2077-9038-2025-2-182-189

Совершенствование методики определения коррозионной стойкости бетона в растворах кислот. Физические представления и математическая постановка задачи

Строкин Константин Борисович (Южно-Сахалинск). Доктор экономических наук, доцент. Технический нефтегазовый институт Сахалинского государственного университета (693000, Сахалинская область, Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290. СахГУ). Эл. почта: strokin07@rambler.ru

Новиков Денис Геннадьевич (Южно-Сахалинск). Кандидат технических наук. Технический нефтегазовый институт Сахалинского государственного университета (693000, Сахалинская область, Южно-Сахалинск, ул. Ленина, 290. СахГУ). Эл. почта: novikov_dg@sakhgu.ru

Аннотация. В статье рассмотрены принципы определения коррозионной стойкости бетонов, эксплуатируемых в кислотной среде различного вида. Анализ процедур подготовки образцов и компонентов жидкой и твёрдой фаз, условий проведения экспериментов, вычислительных процедур показывает, что достоверность получаемых результатов может быть существенно повышена. Для этого необходимо более тщательным образом подойти к проблемам моделирования химических и массообменных процессов в исследуемых системах, привлекая математическую теорию кинетики нестационарных процессов массопереноса в системе «жидкость – твёрдое». В соответствии с изложенными физическими представлениями о методологии проводимых исследований характер кинетических кривых изменения концентраций в жидкой и твёрдой фазах представлен в тексте.

Ключевые слова: фазы «жидкость – твёрдое», межфазный массоперенос, внешняя массоотдача, внутренняя массоотдача, «теория сокращающегося ядра»

Для цитирования. Строкин К.Б., Новиков Д.Г. Совершенствование методики определения коррозионной стойкости бетона в растворах кислот. Физические представления и математическая постановка задачи // Academia. Архитектура и строительство. – 2025. – № 2. – С. 182–189. – DOI: 10.22337/2077-9038-2025-2-182-189.

Improving the Methodology for Determining the Corrosion Resistance of Concrete in Acid Solutions. Physical Concepts and Mathematical Formulation of the Problem

Strokin Konstantin Borisovich (Yuzhno-Sakhalinsk). Doctor of Sciences in Economics. Docent. The Technical Oil and Gas Institute of The Sakhalin State University (290, st. Lenina, Yuzhno-Sakhalinsk, Sakhalin region, 693000, Russia. SSU). E-mail: strokin07@rambler.ru

Novikov Denis Gennadievich (Yuzhno-Sakhalinsk). Candidate of Sciences Technology. The Technical Oil and Gas Institute of The Sakhalin State University (290, st. Lenina, Yuzhno-Sakhalinsk, Sakhalin region, 693000, Russia. SSU). E-mail: novikov_dg@sakhgu.ru

Abstract. The article discusses the principles of determining the corrosion resistance of concrete used in acidic environments of various types. An analysis of the procedures for preparing samples and components of liquid and solid phases, experimental conditions, and computational procedures shows that the reliability of the results obtained can be significantly increased. To

do this, it is necessary to take a more thorough approach to the problems of modeling chemical and mass transfer processes in the systems under study, involving the mathematical theory of the kinetics of unsteady mass transfer processes in the liquid–solid system. In accordance with the outlined physical concepts of the research methodology, the nature of kinetic curves of concentration changes in liquid and solid phases is presented in the text.

Keywords: Phases "liquid – solid", interphase mass transfer, external mass transfer, internal mass transfer, "theory of the contracting core"

For citation. Strokin K.B., Novikov D.G. Improving the Methodology for Determining the Corrosion Resistance of Concrete in Acid Solutions. Physical Concepts and Mathematical Formulation of the Problem. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2025, no. 2, pp. 182–189, doi: 10.22337/2077-9038-2025-2-182-189.

Общепринято, что при исследовании стойкости строительных материалов, изделий и конструкций из них, долговечность зданий и сооружений, работающих в агрессивных средах, определяется в соответствии с нормативной документацией. При этом, одним из определяющих является ГОСТ 31383-2008¹.

В соответствии с данным нормативным документом методика проведения экспериментов кратко может быть проиллюстрирована рисунком 1.

Физическая картина массообменных процессов [1], сопровождающих переход компонентов кислоты в структуру бетонного образца, может быть представлена следующим образом. В соответствии с теорией массопереноса [1; 3] вблизи поверхности раздела фаз «жидкость – твёрдое» всегда существует достаточно тонкий пограничный слой, в пределах которого концентрация переносимого компонента изменяется от значения $C_{ж.ср.}(t)$ до $C_{ж.г.}(t)$. Здесь $C_{ж.ср.}(t)$ – концентрация агрессивного компонента (кислоты) в объёме жидкой фазы [кг/м³], $C_{ж.г.}(t)$ – концентрация кислоты непосредственно вблизи границы твёрдой фазы, [кг/м³].

В соответствии с методикой, изложенной в п. 5 ГОСТ 31383-2008, первоначально принимается, что метод устанавливает принцип определения коррозионной стойкости бетонов, эксплуатируемых в кислотной среде различного вида, и концентрации агрессивного компонента. Образцы для испытаний

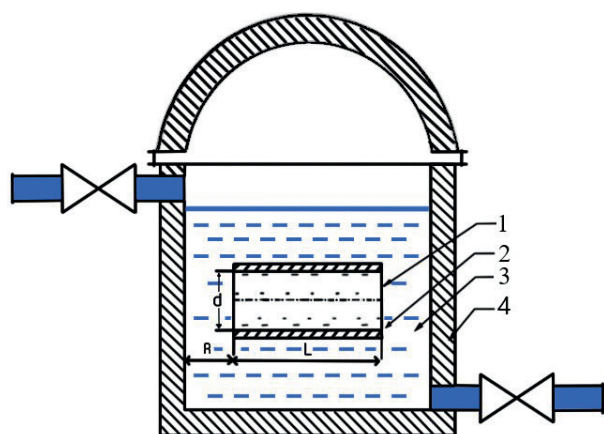
с геометрической точки зрения представляют собой цилиндры размером $d \times l$ (50×50, или 100×100 мм), изготовленные из бетонной смеси согласно заданной рецептуре. Торцовые поверхности образцов остаются открытыми, а наружная поверхность покрывается грунтовкой, шпатлёвкой и двумя слоями эпоксидного клея толщиной $\delta \geq 0,3$ мм.

Для проведения испытаний рекомендуется использовать ёмкости из стекла или полиэтилена объёмом 10...25 дм³. ГОСТ не устанавливает требований по геометрическим размерам ёмкостей (эксикаторов), поэтому схему опытной установки наглядно иллюстрирует рисунок 1. Вместе с тем отмечается, что образцы изготавливаются в количестве трёх экземпляров и каждый помещается в отдельный эксикатор.

Перед испытаниями и периодически в процессе испытаний измеряют концентрацию кислоты. При этом непосредственно перед отбором проб раствор кислоты перемешивают. При уменьшении концентрации кислоты на $(5 \pm 0,1)\%$ по сравнению с исходной раствор кислоты заменяют на новый (осуществляют долив с соответствующей расчётной концентрацией). Устанавливается, что общая продолжительность испытаний образцов составляет шесть месяцев. При этом в первые три недели пробы раствора кислоты отбирают и титруют ежедневно, затем три раза в неделю, и после трёх месяцев испытаний – два раза в неделю. Нетрудно подсчитать, что за всё время испытаний исследователю приходится произвести 75 титрований.

При этом априори открытым остаётся вопрос о кинетике процессов межфазного массопереноса в исследуемой системе «жидкость – твёрдое», а именно: в какой момент (или – через сколько процедур титрований) наступает момент первой смены раствора – снижение концентрации кислоты в ёмкости на $(5 \pm 0,1)\%$.

Дальнейшие процедуры подробно описаны в упомянутом выше ГОСТе². Однако необходимо отметить, что в результате измерений экспериментальных данных и определения расчётных величин строятся графики в координатах $\sqrt{t} - \Gamma_p$, из



1 – бетонный образец размером $L \times B = 50 \times 50$ или 100×100 мм; 2 – слой наружной изоляции, $\delta_{из} \geq 0,3$ мм; 3 – раствор кислоты; 4 – корпус эксикатора.

Рис. 1. Схема экспериментальной установки*

* Все иллюстрации выполнены авторами статьи.

¹ ГОСТ 31383-2008 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний» (<https://vsegest.com/Catalog/48/48712.shtml>).

² Там же.

которых определяют зависимость глубины разрушения бетонного образца – Γ_p , как функцию времени процесса разрушения бетонного образца – $\sqrt{\tau}$.

Анализ процедур подготовки образцов и компонентов жидкой и твёрдой фаз, условий проведения экспериментов, вычислительных процедур показывает, что достоверность получаемых результатов может быть существенно повышена. Для этого необходимо более тщательным образом подойти к проблемам моделирования химических и массообменных процессов в исследуемых системах, привлекая математическую теорию кинетики нестационарных процессов массопереноса в системе «жидкость – твёрдое» [5].

В соответствии с изложенными физическими представлениями о методологии проводимых исследований характер кинетических кривых изменения концентраций в жидкой и твёрдой фазах может быть представлен на рисунке 2.

Кривые А и Б на этом рисунке показывают изменение концентрации кислоты и, соответственно, прореагировавших ионов Ca^{2+} в условиях, когда долива кислоты не происходит. Кривые 1 и 2 показывают изменение значений этих же параметров с доливом (или полной заменой) кислоты в моменты времени, характеризующие окончанием периодов I, II. Характер кривых данного рисунка чётко показывает, что в данной системе «жидкость – твёрдое» осуществляются массообменные процессы, протекающие в диффузионно-кинетической области [4; 5].

Рисунок 3 иллюстрирует начальные стадии протекания процессов массопереноса. В соответствии с плёночной теорией массообменных процессов [1; 3; 5] Льюиса и Уитмена, при возникновении контакта между реагирующими фазами в жидкости образуется ламинарная плёнка, в которой происходит изменение концентрации реагента в соответствии с кривыми, расположенными слева от оси начала координат. При этом традиционно, слева направо, будем располагать положительное направление оси x , а справа налево – положительное направление оси x^* .

В соответствии с физическими представлениями о закономерностях межфазного массопереноса [1; 6] поток массы вещества из объёма жидкой фазы к поверхности образца будет характеризоваться значением диффузионного числа Нуссельта (Nu_d), зарубежным аналогом является число Шервуда (Sh):

$$(Nu_d) = Sh = \beta l / D \quad (1)$$

здесь: β – коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, м/с; D – коэффициент диффузии кислоты в воде, $\text{м}^2/\text{с}$; l – определяющий размер, м.

В условиях, показанных на рисунке 1, образец моделируется неограниченной пластиной. Для этого случая определяющим размером принимается толщина пластины. Плотность потока массы реагента из объёма жидкой фазы к границе определяется массоотдачей из объёма жидкости к границе через ламинарный слой $\delta_{л}$:

$$j_{жс}(\tau) = \beta [C_{жс}(\tau) - C_{жс.р.}(\tau)] \quad (2)$$

Плотность потока массы ионов из толщи бетона к границе раздела фаз записывается так:

$$j_6(\tau) = -k \left. \frac{\partial C(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (3)$$

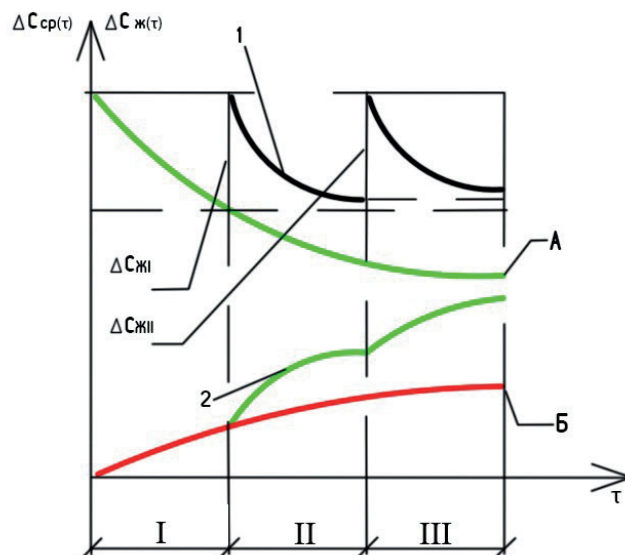
здесь: $C(x, \tau)$ – концентрация ионов Ca^{2+} в точке с координатой в момент времени τ ; k – коэффициент массопроводности (диффузии в твёрдом теле), $\text{м}^2/\text{с}$.

Уравнение баланса массы записывается:

$$j_{жс}(\tau) = j_6(\tau) \cdot E \quad (4)$$

С учётом этого можно записать уравнение баланса:

$$V_{жс} \frac{\partial C_{жс}(\tau)}{\partial \tau} = -SEk \left. \frac{\partial C(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (5)$$



1 – жидкая фаза; 2 – бетонный образец. I, II, III – периоды смены (долива) кислоты; А, Б – кинетические кривые без смены (долива) кислоты; ΔC_{жI}, ΔC_{жII} – изменения концентраций кислоты в периоды I и II смены (долива)

Рис. 2. Изменение концентрации кислоты в жидкости и образце

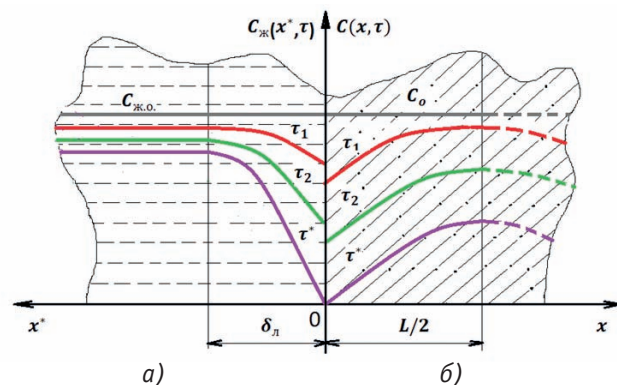


Рис. 3. Начальные стадии процессов массопереноса: а) жидкая фаза; б) твёрдая фаза

здесь: S – площадь поверхности образца, m^2 ; $V_{ж}$ – объём жидкости в эксикаторе, m^3 ; E – константа равновесия (константа Генри), $кг/кг$.

Принимаем состояние жидкости в течение эксперимента неподвижной субстанцией. Для этого случая процесс массопереноса кислоты в жидкой фазе может быть рассмотрен как нестационарная диффузия (массоотдача) в ламинарном слое. Краевая задача диффузии запишется в виде [5; 7]:

$$\frac{\partial C_{ж}(x^*, \tau)}{\partial \tau} = D_{ж} \frac{\partial^2 C_{ж}(x^*, \tau)}{\partial (x^*)^2}; \quad \tau > 0; \quad 0 \leq x^* \leq R. \quad (6)$$

Начальное условие:

$$C_{ж}(x^*, \tau)|_{\tau=0} = C_{ж.о.} \quad (7)$$

Граничные условия:

$$C_{ж}(x^*, \tau)|_{x^*=0} = 0; \quad (8)$$

$$\frac{\partial C_{ж}(x^*, \tau)}{\partial x^*} \Big|_{x^*=R} = 0. \quad (9)$$

Введём безразмерные переменные вида:

$$U(\bar{x}^*, Fo_m^*) = \frac{C_{ж}(x^*, \tau)}{C_{ж.о.}}; \quad \bar{x}^* = \frac{x^*}{R}; \quad Fo_m^* = \frac{D_{ж} \tau}{R^2}, \quad (10)$$

здесь: R – размер от стенки до поверхности. При $x^* = R \rightarrow \bar{x}^* = 1$.

С учётом этого краевая задача преобразуется к виду:

$$\frac{\partial U(\bar{x}^*, Fo_m^*)}{\partial Fo_m^*} = \frac{\partial^2 U(\bar{x}^*, Fo_m^*)}{\partial (\bar{x}^*)^2}; \quad Fo_m^* \geq 0; \quad 0 \leq \bar{x}^* \leq 1. \quad (11)$$

Начальное условие:

$$U(\bar{x}^*, Fo_m^*)|_{Fo_m^*=0} = 1. \quad (12)$$

Граничные условия:

$$U(\bar{x}^*, Fo_m^*)|_{\bar{x}^*=0} = 0; \quad (13)$$

$$\frac{\partial U(\bar{x}^*, Fo_m^*)}{\partial \bar{x}^*} \Big|_{\bar{x}^*=1} = 0. \quad (14)$$

Решение данной задачи с учётом математических выкладок [2], может быть представлено в виде:

$$U(\bar{x}^*, Fo_m^*) = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m+1}}{\mu_m} \cdot \sin(\mu_m \bar{x}^*) \exp(-\mu_m^2 Fo_m^*); \quad (15)$$

$$\mu_m = (2m-1) \frac{\pi}{2}. \quad (16)$$

Протекание массообменных процессов на границе раздела фаз осуществляется в соответствии с законом сохранения взаимодействующих масс и химической кинетикой:

$$-D_{ж} \frac{\partial C_{ж}(x^*, \tau)}{\partial x^*} \Big|_{x^*=0} = -E \frac{\partial C(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0}. \quad (17)$$

В безразмерных переменных:

$$Ki_m^*(Fo_m^*) = EK_i_m(Fo_m), \quad (18)$$

здесь: E – стехиометрический коэффициент;

$$Ki_m^*(Fo_m^*) = \frac{j_{ж}(\tau)R}{D_{ж}C_{ж.о.}}; \quad Ki_m(Fo_m) = \frac{j_{\sigma}(\tau)l}{kC_o}; \quad (19)$$

Исходя из этого, задача диффузии ионов Ca^{2+} в образце на первом этапе сводится к задаче нестационарной диффузии с граничными условиями второго рода. В безразмерных переменных она запишется так:

$$\frac{\partial U(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=0} = Ki_m(Fo_m); \quad (20)$$

$$\frac{\partial U(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=1} = 0; \quad (21)$$

Решение этой задачи, полученное методом интегрального преобразования Лапласа для случая постоянного значения критерия Кирпичева, имеет вид:

$$U(\bar{x}, Fo_m) = 1 - Ki_m Fo_m - \frac{2}{\pi^2} Ki_m \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^2} \cos(\pi m \bar{x}) \cdot [1 - \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m)]. \quad (22)$$

Средние значения концентраций исследуемых компонентов во взаимодействующих фазах определяются из решения интегральных уравнений:

– для жидкой фазы:

$$U_{cp}(Fo_m^*) = \int_0^1 U(\bar{x}^*, Fo_m^*) d\bar{x}^* = \int_0^1 d\bar{x}^* - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m+1}}{\mu_m} \exp(-\mu_m^2 Fo_m^*) \cdot \int_0^1 \sin(\mu_m \bar{x}^*) d\bar{x}^* = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m+1}}{\mu_m^2} \exp(-\mu_m^2 Fo_m^*); \quad (23)$$

– для твёрдой фазы:

$$U_{cp}(Fo_m) = \int_0^1 U(\bar{x}, Fo_m) d\bar{x} = \int_0^1 d\bar{x} - \int_0^1 Ki_m Fo_m d\bar{x} - \frac{2}{\pi^2} Ki_m \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^2} \cdot [1 - \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m)] \int_0^1 \cos(\pi m \bar{x}) d\bar{x}. \quad (24)$$

Нетрудно убедиться, что определённый интеграл под знаком суммы в выражении (24) принимает значение равное нулю. Вследствие этого запись решения упрощается:

$$U_{cp}(Fo_m) = 1 - Ki_m Fo_m. \quad (25)$$

В качестве иллюстративного примера некоторые результаты расчётов по выражениям (23) и (25) приведены на рисунке 4.

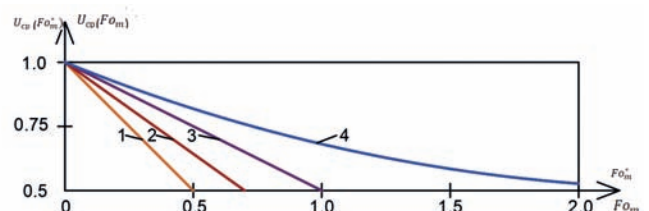


Рис. 4. Изменение средних безразмерных концентраций в жидкой (4) и твёрдой (1, 2, 3) фазах в зависимости от чисел Кирпичёва и Фурье Ki_m : 1–1; 2–0,7; 3–0,5

Отметим интересный характер поведения кривых на данном рисунке, который неявно, но отражает физические особенности массообменного процесса, а именно: повышение значений числа Кирпичёва приводит к более быстрому «обеднению» поверхностного слоя бетонного образца ионами Ca^{2+} (линии 1, 2, 3). В то же время, характер кривой 4 чётко показывает нарастание диффузионного сопротивления массопереносу в твёрдой фазе при возрастании числа Фурье.

Решение общей задачи межфазного массопереноса будет неполным без учёта баланса массы, определяемого выражением (5). Используя принятые ранее обозначения (10) и (19), перепишем (5) в безразмерном виде:

$$K_L \frac{\partial U_{cp}(Fo_m^*)}{\partial Fo_m^*} = -E \frac{\partial U(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=0}, \quad (26)$$

здесь: $K_L = V_{ж}/SR$ – безразмерный геометрический комплекс; m – как и прежде, константа равновесия (константа Генри), кг/кг. Слагаемое в левой части в формуле (26) определится дифференцированием выражения (23) по переменной Fo_m^* :

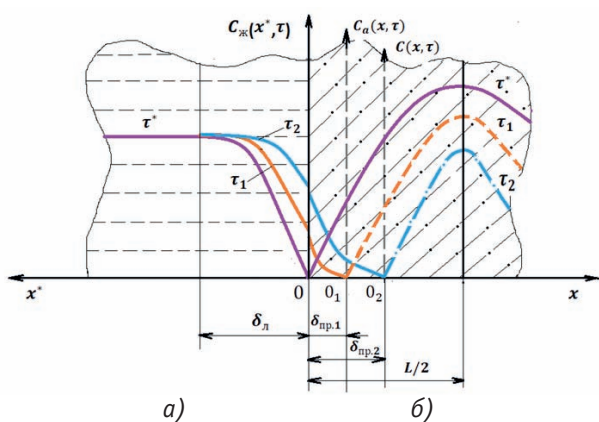
$$\frac{\partial U_{cp}(Fo_m^*)}{\partial Fo_m^*} = \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^{m+1} \cdot \exp(-\mu_m^2 Fo_m^*). \quad (27)$$

Эта запись и определяет в итоге кинетику изменения граничного условия к задаче массопереноса в твёрдой фазе:

$$Ki_m(Fo_m) = -K_L \frac{1}{E} \frac{\partial U_{cp}(Fo_m^*)}{\partial Fo_m^*} = -K_L \frac{1}{E} \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^{m+1} \cdot \exp(-\mu_m^2 Fo_m^*). \quad (28)$$

Приступим к анализу процессов, протекающих в анализируемой системе на втором этапе, начинающемся с момента времени τ^* . Физическая картина рассматриваемых процессов иллюстрируется рисунком 5.

Жидкая среда, находящаяся в эксикаторе, может быть или раствором неорганической соли, или органической, являющейся продуктом метаболизма бактерий. Агрессивный



O_1, O_2 – центры вспомогательных осей ординат (центр); $C_{ж}(x^*, \tau)$ – концентрация агрессивного компонента в жидкости; $C_a(x, \tau)$ – концентрация агрессивного компонента в слое продукта реакции; $C(x, \tau)$ – концентрация ионов Ca^{2+} в зоне непрореагировавшего исходного образца

Рис. 5. Стадия диффузионно-химической кинетики: а) жидкая фаза; б) твёрдая фаза

компонент этой жидкости взаимодействует с гидроксидом кальция поровой жидкости бетонного образца.

Образующиеся в результате химического взаимодействия продукты реакции в форме порошка твёрдой фазы оседают на внутренней поверхности сквозных и открытых пор, снижая пористость и понижая тем самым значение коэффициента массопроводности (диффузии в твёрдой фазе).

Наращение линейного размера прореагировавшей зоны реакции твёрдой фазы приводит к осложнению механизма диффузионного массопереноса. В соответствии с рисунком 5 к моменту времени τ_1 концентрация ионов Ca^{2+} на границе $\delta_{пр.1}$ становится равной нулю. Поступающий к поверхности образца агрессивный компонент продолжает продвигаться внутрь образца, к моменту времени τ_2 толщина слоя продукта станет $\delta_{пр.2}$.

Таким образом, на данном этапе механизм массопереноса становится состоящим из стадий: массоотдача из объёма жидкой фазы к границе раздела фаз, массопроводность в слое продукта реакции, химическая реакция на границе слоя продукта реакции и растворённых солей гидроксида кальция.

И вновь отметим немаловажный аспект – в соответствии с современными представлениями об особенностях кинетики химико-технологических процессов [5; 7; 11] в системах «газ – твёрдое» и «жидкость – твёрдое» на границе взаимодействующих фаз постулируется равновесие фаз. Математически оно определяется аналогом формулы (4) в виде:

$$C_{ж.р.}(x^*, \tau) \Big|_{x^*=0} = C_{a.р.}(x, \tau) \Big|_{x=0} \quad (29)$$

В этих условиях краевая задача нестационарной диффузии агрессивного компонента в слое продукта реакции в безразмерном виде запишется следующим образом:

$$\frac{\partial U_a(\bar{x}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 U_a(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}^2}; \quad Fo_m \geq 0; \quad 0 \leq \bar{x} \leq 1 \quad (30)$$

$$U_a(\bar{x}, Fo_m) \Big|_{Fo_m=0} = U_{a.o.}(\bar{x}) \quad (31)$$

$$\frac{\partial U_a Fo_m}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=0} = -Ki_F \quad (32)$$

$$U_a(\bar{x}, Fo_m) \Big|_{\bar{x}=1} = 0 \quad (33)$$

Здесь обозначено:

$$\bar{x} = \frac{x}{\delta_{н.р.}}; \quad U_a(\bar{x}, Fo_m) = \frac{C_a(x, \tau)}{C_{a.р.}}; \quad Fo_m = \frac{D_{н.р.} \tau}{\delta_{н.р.}^2}; \quad Ki_F = \frac{q_F \delta_{н.р.}}{D_{н.р.} C_{a.р.}}. \quad (34)$$

Решение краевой задачи (30) – (33) имеет следующий вид:

$$U_a(\bar{x}, Fo_m) = \int_0^1 U_{a.o.}(\xi) d\xi - \frac{Ki_F}{6} (6Fo_m + 3\bar{x}^2 - 1) + + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \left\{ \frac{Ki_F}{\pi^2} \cdot \frac{(-1)^m}{m} + + \int_0^1 U_{a.o.}(\xi) \cos(\pi m \xi) d\xi \right\} \quad (35)$$

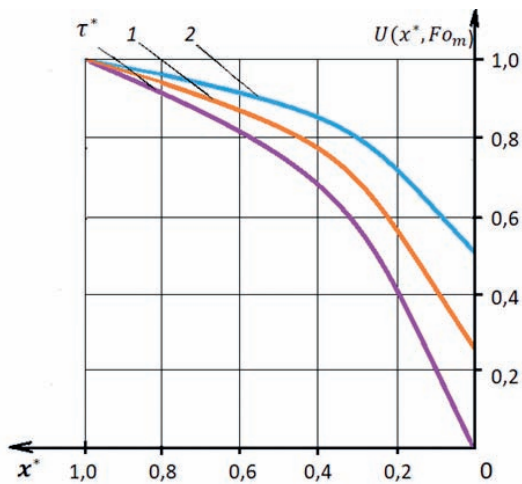


Рис. 6. Динамика безразмерных полей концентраций агрессивного компонента в модельном пограничном слое жидкой фазы $\tau_1 > \tau_2 > \tau^*$

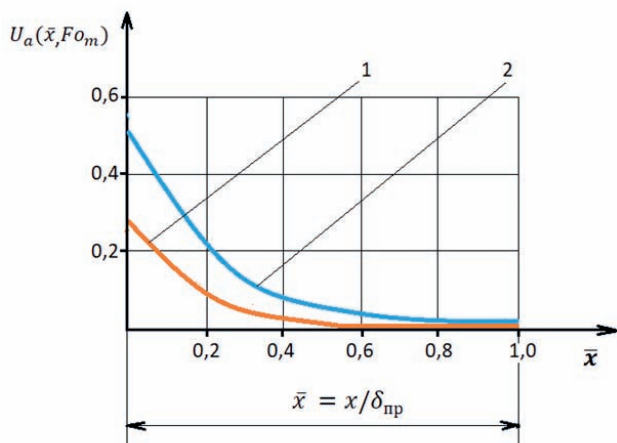


Рис. 7. Динамика безразмерных полей концентраций агрессивного компонента в слое продукта реакции твёрдой фазы

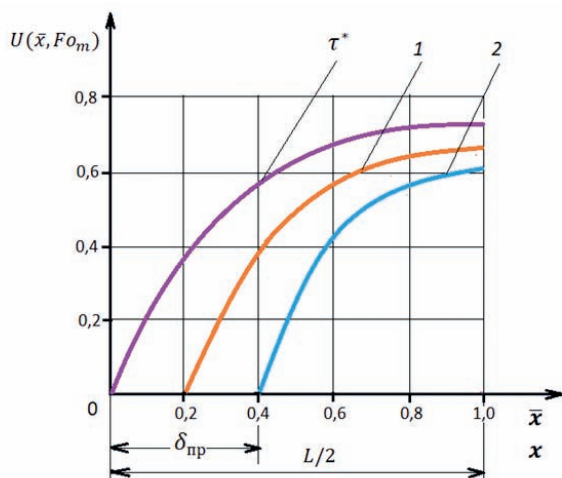


Рис. 8. Профили концентраций ионов Ca^{2+} , диффундирующих в поровом пространстве бетонного образца в направлении фронта реакции

Краевая задача нестационарной внутренней диффузии ионов кальция с формальной точки зрения упрощается и принимает вид:

$$\frac{\partial U(\bar{x}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 U(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}^2}; Fo_m \geq 0; 0 \leq \bar{x} \leq 1 \quad (36)$$

$$U(\bar{x}, Fo_m)|_{Fo_m=0} = U_o(\bar{x}) \quad (37)$$

$$U(\bar{x}, Fo_m)|_{\bar{x}=0} = 0 \quad (38)$$

$$\frac{\partial U(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=1} = 0, \quad (39)$$

здесь, приняты следующие обозначения:

$$\bar{x} = \frac{x}{\frac{L}{2} - \delta_{n.p.}}; Fo_m = \frac{D\tau}{\left(\frac{L}{2} - \delta_{n.p.}\right)^2}; U(\bar{x}, Fo_m) = \frac{C(x, \tau)}{C_p}. \quad (40)$$

И вновь, опуская промежуточные преобразования, запишем окончательный вид решений краевых задач (30)–(33) и (35)–(38), полученные методом интегрального преобразования Лапласа [7; 9; 11]:

$$U(\bar{x}, Fo_m) = -\bar{x} + \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m+1}}{m} \sin(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \sin(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^1 U_0(\xi) \sin(\pi m \xi) d\xi \quad (41)$$

Для удобства проведения вычислений, введём в рассмотрение дополнительные (вспомогательные) оси симметрии с центрами O_1, O_2 и определим положительное направление координаты x от центров этих осей в сторону границы раздела фаз. Для этих условий решение краевой задачи нестационарного массопереноса запишется так:

$$U(\bar{x}, Fo_m) = -1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\mu_m \bar{x}) \exp(-\mu_m^2 Fo_m) \cdot \left\{ \frac{(-1)^{m+1}}{\mu_m} + \int_0^1 U_0(\xi) \cos(\mu_m \xi) d\xi \right\}; \mu_m = \pi(m - 0,5) \quad (42)$$

Некоторые результаты расчётов по разработанному математическому описанию приведены на рисунках 6–8. При этом для удобства анализа расчётные результаты приведены в форме графических зависимостей безразмерных функций, характеризующих динамику профилей концентраций агрессивного компонента в модельном пограничном слое жидкой фазы агрессивного компонента (рис. 6); внутренняя диффузия агрессивного компонента от границы раздела фаз в структуру твёрдой фазы бетонного образца через слой продукта реакции (рис. 7); и далее (рис. 8) – диффузия ионов Ca^{2+} из пористой структуры образца к формальной границе фронта реакции.

Отчётливо прослеживаются все качественные показатели процессов массопереноса и их соответствие физико-математическим представлениям, заложенным в основу математического анализа.

Безусловно, для использования разработанной методологии в реальных расчётах для определения конкретных

сроков долговечности материала строительной конструкции под воздействием коррозионного процесса исследователю будут необходимы дополнительные знания. А именно: о конкретных свойствах исследуемого бетонного образца, материал которого будет запланирован в проектируемой конструкции (плотность, пористость, прочностные показатели, сорбционная влажность). Потребуется информация и о физико-химических показателях агрессивного компонента, в среде которого будет эксплуатироваться конструкция. Немаловажным фактором, влияющим на показатели процессов, являются данные мониторинга тепло-влажностных показателей атмосферы воздушной среды эксплуатации объектов строительства.

Обобщая сказанное, можно сделать следующие выводы.

Кривые рисунков 6, 7 и 8 раскрывают логистическую цепочку – последовательность стадий процессов массопереноса на обоих моделируемых этапах. Первая характеризует диффузионно-кинетическую стадию массообменного процесса на границе раздела твёрдой и жидкой фаз. Основное изменение концентрации агрессивного компонента происходит в пристенном пограничном слое величиной $\delta_{\text{л}}$. Поток вещества из ядра жидкой фазы к границе раздела протекает по механизму внешней массоотдачи [1; 3].

Перенос реакционного вещества – ионов кальция – из внутренних слоёв пористой структуры испытуемого образца к границе фронта реакции, определяемой координатой абсциссы $x = 0$, происходит посредством внутренней массоотдачи.

Как уже отмечалось выше, первый этап завершается к моменту времени τ^* , когда, в соответствии с физической моделью, концентрации реагирующих компонентов становятся равными нулю. С этого момента в твёрдой фазе образца формируется зона продукта реакции, которая в соответствии с рисунком 5 для моментов времени τ_1 и τ_2 определяется величинами $\delta_{\text{пр.1}}$ и $\delta_{\text{пр.2}}$. Профили безразмерных концентраций агрессивного компонента в зоне продукта реакции характеризуются модельными кривыми (рис. 7). При этом стоит отметить, что наличие только двух кривых на данном рисунке чётко отражает физику процесса: формирование зоны с момента времени $\tau = \tau^*$.

И, наконец, кривые рисунка 8 иллюстрируют динамику продвижения фронта реакции вглубь образца. Это явление в теории химико-технологических процессов [5; 11] носит название «теория сокращающегося ядра».

Список источников

1. Шервуд, Т. Массопередача / Т. Шервуд, Р. Пигфорд, Ч. Уилки ; пер. с англ. – Москва : Химия, 1982. – 696 с. – Текст : непосредственный.
2. Федосов, С.В. Методы теории математической физики в приложениях к проблемам коррозии бетона в жидких

агрессивных средах / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников. – Москва : АСВ, 2021. – 244 с. – Текст : непосредственный.

3. Левич, В.С. Физико-химическая гидродинамика / В.С. Левич. – Москва : Физматгиз, 1959. – 524 с. – Текст : непосредственный.

4. Алексеев, С.Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде / С.Н. Алексеев, Н.К. Розенталь. – Москва : Стройиздат, 1976. – 205 с. – Текст : непосредственный.

5. Кутепов, А.М. Общая химическая технология: химические процессы и реакторы : Учебник для вузов / А.М. Кутепов, Т.И. Бондарева, М.Г. Беренгартен ; изд. 4, перераб. и доп. – Москва : URSS, 2022. – 512 с. – Текст : непосредственный.

6. Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1963. – 536 с. – Текст : непосредственный.

7. Федосов, С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии / С.В. Федосов. – Иваново, ПресСто, 2010. – 364 с. – Текст : непосредственный.

8. Справочник химика : В 7 томах / Под ред. Б.П. Никольского. – Ленинград : Химия, Ленинградское отделение, 1966–1968. – Текст : непосредственный.

9. Рудобашта, С.П. Диффузия в химико-технологических процессах / С.П. Рудобашта, Э.М. Карташов. – Москва : КолосС, 2010. – 478 с. – Текст : непосредственный.

10. Карташов, Э.М. Аналитическая теория теплопроводности и прикладной термоупругости / Э.М. Карташов, В.А. Кудинов. – Москва : URSS, 2018. – 656 с. – Текст : непосредственный.

11. Рудобашта, С.П. Массоперенос в процессах сушки, адсорбции, экстрагирования, диффузионной проницаемости / Рудобашта С.П. – Москва : Колос-с, 2024. – 573 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Shervud T., Pigford R., Uilki Ch. Massoperedacha [Mass Transfer], trans. from Engl. Moscow, Khimiya Publ., 1982, 696 p. (In Russ.)
2. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasil'nikov I.V. Metody teorii matematicheskoi fiziki v prilozheniyakh k problemam korrozii betona v zhidkikh agressivnykh sredakh [Methods of the Theory of Mathematical Physics in Applications to Problems of Concrete Corrosion in Liquid Aggressive Environment]. Moscow, ASV Publ., 2021, 244 p. (In Russ.)
3. Levich V.S. Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika [Physical and Chemical Hydrodynamics]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1959, 524 p. (In Russ.)
4. Alekseev S.N., Rozental' N.K. Korroziionnaya stoikost' zhelezobetonnykh konstruksii v agressivnoi promyshlennoi srede [Corrosion Resistance of Reinforced Concrete

Structures in an Aggressive Industrial Environment]. Moscow, Stroizdat, 1976, 205 p. (In Russ.)

5. Kutepov A.M., Bondareva T.I., Berengarten M.G. Obshchaya khimicheskaya tekhnologiya: khimicheskie protsessy i reaktory [General Chemical Technology: Chemical Processes And Reactors], Textbook for universities. Moscow, URSSPb, 2022, 512 p. (In Russ.)

6. Lykov A.V., Mikhailov Yu.A. Teoriya teplo- i massoperenosa [Theory of Heat and Mass Transfer]. Moscow; Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1963, 536 p. (In Russ.)

7. Fedosov S.V. Teplomassoperenos v tekhnologicheskikh protsessakh stroitel'noi industrii [Heat and Mass Transfer in Technological Processes of the Construction Industry]. Ivanovo, PresSto Publ., 2010, 364 p. (In Russ.)

8. Nikol'skii B.P. (ed.). Spravochnik khimika [Chemist's Handbook], In 7 volumes. Leningrad, Khimiya, Leningradskoe

otdelenie [Leningrad Branch] Publ., 1966–1968. (In Russ.)

9. Rudobashta S.P., Kartashov E.M. Diffuziya v khimiko-tekhnologicheskikh protsessakh [Diffusion in Chemical-Engineering Processes]. Moscow, KolosS Publ., 2010, 478 p. (In Russ.)

10. Kartashov E.M. Kudinov V.A. Analiticheskaya teoriya teploprovodnosti i prikladnoi termouprugosti [Analytical Theory of Thermal Conductivity and Applied Thermoelasticity]. Moscow, URSS Publ., 2018, 656 p. (In Russ.)

11. Rudobashta S.P. Massoperenos v protsessakh sushki, adsorbtsii, ekstragirovaniya, diffuzionnoi pronitsaemosti [Mass Transfer in the Processes of Drying, Adsorption, Extraction, Diffusion Permeability]. Moscow, Kolos-s Publ., 2024, 573 p. (In Russ.)