

УДК 691.32:620.193:66.021.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ И ДИНАМИКИ МАССОПЕРЕНОСА ПРИ ЖИДКОСТНОЙ КОРРОЗИИ ПЕРВОГО ВИДА ЦЕМЕНТНОГО БЕТОНА КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИЕЙ КРИВОЙ РАВНОВЕСИЯ Часть 2. Реализация численного и натурального экспериментов

*С. В. Федосов, Н. Л. Федосова, В. Е. Румянцева,
В. С. Коновалова, М. Е. Шестеркин*

Ивановский государственный политехнический университет (г. Иваново)

Аннотация. Разные виды цементов характеризуются различной стойкостью против действия тех или иных агрессивных факторов, поэтому выбор цементов для бетонов различного назначения производится с учетом не только их прочностных показателей, но и стойкости против действия тех агрессивных сред, в которых должны работать бетонные конструкции. Комплексное исследование массообменных процессов при жидкостной коррозии цементных бетонов с учетом влияния свойств портландцемента и разработка математических моделей с целью прогнозирования долговечности и надежности строительных конструкций являются актуальными с научной и практической точек зрения.

Целями данной работы являются развитие теоретических представлений о процессах жидкостной коррозии I вида с учетом влияния свойств портландцемента; определение основных параметров (коэффициентов массопроводности, массоотдачи) для различных марок портландцемента, изучение кинетики и динамики исследуемых процессов.

Проведены исследования жидкостной коррозии бетона первого вида с целью апробации разработанной математической модели кинетики переноса «свободного гидроксида кальция». Выполнены численный эксперимент с целью изучения влияния коэффициентов внутреннего и внешнего массопереноса (для различных марок портландцемента) на кинетику и динамику процесса коррозии бетона, а также постановка и проведение натурального эксперимента для проверки адекватности предлагаемой математической модели и разрабатываемого инженерного метода расчета. При анализе данных эксперимента получены профили концентраций «свободного гидроксида кальция» по толщине образцов в водной среде. Для разных марок портландцемента рассчитаны показатели массопереноса. Результаты численного эксперимента показывают существенную зависимость коэффициента массопроводности от марки портландцемента. Установлены временные зависимости потоков переносимого целевого компонента для различных марок цемента, которые позволяют прогнозировать продолжительность процесса коррозии бетона I вида. Сходимость данных, полученных в результате численного и натурального экспериментов, позволяет использовать разработанную математическую модель и предложенный метод расчета процесса массопереноса при коррозии первого вида на реальных объектах, учитывая марку применяемого портландцемента.

Ключевые слова: массоперенос; жидкостная коррозия бетона первого вида; математическое моделирование.

Введение. Разные виды цементов характеризуются различной стойкостью против действия тех или иных агрессивных факторов, поэтому выбор цементов для бетонов различного назначения производится с учетом не только их

прочностных показателей, но и стойкости против действия тех агрессивных сред, в которых должны работать бетонные конструкции.

Таким образом, проблема коррозионной деструкции объектов строительного комплек-

са, от решения которой во многом зависит безопасность современных городов, несмотря на существующие научные и инженерные разработки, становится все злободневнее. Поэтому комплексное исследование массообменных процессов при жидкостной коррозии цементных бетонов с учетом влияния свойств портландцемента и разработка математических моделей с целью прогнозирования долговечности и надежности строительных конструкций являются актуальными с научной и практической точек зрения.

В части 1 данной работы получена математическая модель процесса диффузии целого компонента «свободного гидроксида кальция» в твердой фазе цементного бетона с учетом воздействия жидкой нейтральной среды, которая позволяет получить решения краевой задачи массопереноса в замкнутой системе «цементный бетон – жидкость» и дает возможность расчета одновременно кинетики и динамики массопереноса, с учетом влияния свойств портландцемента. Представлена методика расчета, базирующаяся на кусочно-линейной аппроксимации линий равновесия, за пределами зоны действия закона Генри.

Целью работы является апробация разработанной математической модели, проводимая с учетом результатов исследований жидкостной коррозии цементов различных марок.

Техника и результаты эксперимента. Жидкостная коррозия бетона I вида исследовалась на образцах-кубах размером $3 \times 3 \times 3$ см, изготовленных из портландцемента марок ПЦ 400-Д-0, ПЦ 500-Д-0, ПЦ 550-Д-0 с водоцементным отношением В/Ц = 0,3. Исследуемая система для портландцемента каждой марки составлялась из плотно подогнанных друг к другу пластин размером $1 \times 3 \times 3$ см. Боковые грани пластин, а также торцевая грань нижней пластины покрывались слоем битумно-полимерной мастики холодного отверждения марки «Дорос-МБПХ».

Образцы погружались в водную среду объемом 1000 см^3 с $\text{pH} = 6,6$, откуда с периодичностью 14 суток отбирались пробы для титрования объемом 10 см^3 . На момент по-

гружения возраст образцов достиг 28 суток. В качестве реакционной среды использовалась дистиллированная вода.

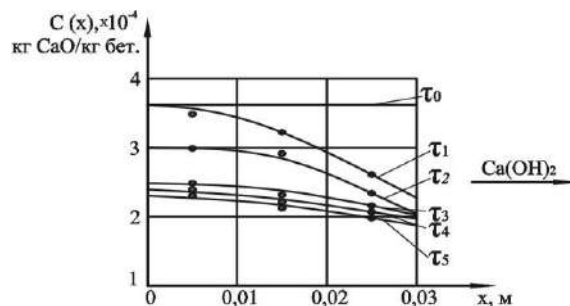


Рис. 1. Профили концентраций $\text{Ca}(\text{OH})_2$ по толщине образца цементного камня на портландцементе марки ПЦ 400-Д-0 в водной среде при τ : 1 – 14 сут.; 2 – 28 сут.; 3 – 42 сут.; 4 – 56 сут.; 5 – 70 сут.

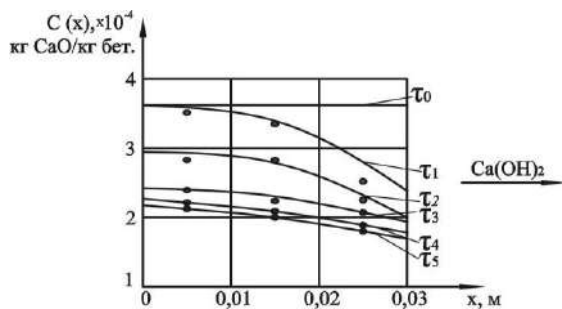


Рис. 2. Профили концентраций $\text{Ca}(\text{OH})_2$ по толщине образца цементного камня на портландцементе марки ПЦ 500-Д-0 в водной среде при τ : 1 – 14 сут.; 2 – 28 сут.; 3 – 42 сут.; 4 – 56 сут.; 5 – 70 сут.

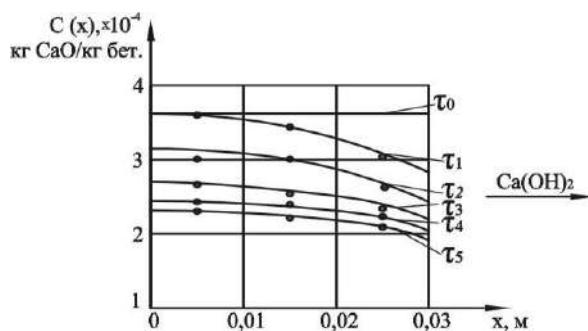


Рис. 3. Профили концентраций $\text{Ca}(\text{OH})_2$ по толщине образца цементного камня на портландцементе марки ПЦ 550-Д-0 в водной среде при τ : 1 – 14 сут.; 2 – 28 сут.; 3 – 42 сут.; 4 – 56 сут.; 5 – 70 сут.

О кинетике и степени развития процессов коррозии судили на основании результатов химических анализов жидкой и твердой фаз, а также других исследований, позволяющих судить об изменениях, происшедших в цементном камне и жидкости в результате их взаимо-

действия. Изучение состава образцов цементного камня после воздействия дистиллированной воды осуществлялось методами дифференциально-термического анализа и комплексонометрии [1]. В результате получены профили концентраций гидроксида кальция по

толщине образцов в водной среде (рис. 1-3).

Кроме того, комплексонометрическим методом объемного анализа проводился контроль содержания катионов кальция в растворах, результаты которого представлены на рисунке 4.

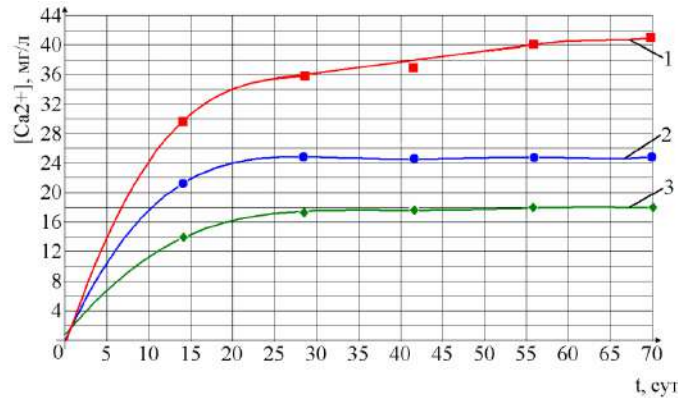


Рис. 4. Изменение концентрации катионов Ca^{2+} в жидкой фазе: 1 – образец цементного камня на портландцементе марки ПЦ 400-Д-0; 2 – образец цементного камня на портландцементе марки ПЦ 500-Д-0; 3 – образец цементного камня на портландцементе марки ПЦ 550-Д-0

Анализ результатов эксперимента.

Анализируя профили концентраций гидроксида кальция по толщине бетона (см. рис. 1-3) для разных марок портландцемента, определяем градиенты концентраций на границе раздела фаз и по формуле (1) рассчитываем значение коэффициента массопроводности k :

$$k = \frac{i}{\rho_0 \frac{dC}{dx}}, \quad (1)$$

где i – плотность потока массы вследствие химических реакций, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; ρ_0 – плотность

твёрдой фазы, $\text{кг}/\text{м}^3$; dC/dx – градиент концентрации переносимого компонента на границе фаз.

Значение коэффициента массоотдачи β , согласно модели Льюиса-Уитмена, рассчитывается по формуле

$$\beta = \frac{i}{\Delta C'_{c,cp}}, \quad (2)$$

где $\Delta C'_{c,cp}$ – средняя по поверхности массообмена разность концентраций, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Результаты расчетов представлены в таблицах 1-3.

Таблица 1

Экспериментально рассчитанные характеристики массопереноса для образца цементного камня на портландцементе марки ПЦ 400-Д-0

№ п/п	Наименование показателя	τ , сут.				
		14	28	42	56	70
1	Плотность потока массы вещества, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$1,37 \cdot 10^{-8}$	$7,72 \cdot 10^{-9}$	$1,29 \cdot 10^{-9}$	$1,11 \cdot 10^{-9}$	$8,27 \cdot 10^{-10}$
2	Коэффициент массопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$	$8,95 \cdot 10^{-10}$	$5,55 \cdot 10^{-10}$	$1,11 \cdot 10^{-10}$	$1,05 \cdot 10^{-10}$	$1,02 \cdot 10^{-10}$
3	Коэффициент массоотдачи, $\text{м}/\text{с}$	$9,21 \cdot 10^{-7}$	$9,19 \cdot 10^{-7}$	$9,21 \cdot 10^{-7}$	$9,17 \cdot 10^{-7}$	$9,18 \cdot 10^{-7}$
4	Массообменный критерий Фурье	1,203	0,746	0,149	0,141	0,137

Таблица 2

Экспериментально рассчитанные характеристики массопереноса для образца цементного камня на портландцементе марки ПЦ 500-Д-0

№ п/п	Наименование показателя	τ , сут.				
		14	28	42	56	70
1	Плотность потока массы вещества, кг/(м ² ·с)	$2,55 \cdot 10^{-8}$	$5,14 \cdot 10^{-9}$	$1,29 \cdot 10^{-10}$	$1,01 \cdot 10^{-10}$	$8,27 \cdot 10^{-11}$
2	Коэффициент массопроводности, м ² /с	$1,78 \cdot 10^{-9}$	$3,71 \cdot 10^{-10}$	$1,54 \cdot 10^{-11}$	$1,41 \cdot 10^{-11}$	$1,38 \cdot 10^{-11}$
3	Коэффициент массоотдачи, м/с	$9,19 \cdot 10^{-7}$	$9,18 \cdot 10^{-7}$	$9,21 \cdot 10^{-7}$	$9,18 \cdot 10^{-7}$	$9,19 \cdot 10^{-7}$
4	Массообменный критерий Фурье	2,392	0,499	0,207	0,19	0,186

Таблица 3

Экспериментально рассчитанные характеристики массопереноса для образца цементного камня на портландцементе марки ПЦ 550-Д-0

№ п/п	Наименование показателя	τ , сут.				
		14	28	42	56	70
1	Плотность потока массы вещества, кг/(м ² ·с)	$3,53 \cdot 10^{-8}$	$4,51 \cdot 10^{-9}$	$3,86 \cdot 10^{-10}$	$2,57 \cdot 10^{-10}$	$1,29 \cdot 10^{-10}$
2	Коэффициент массопроводности, м ² /с	$2,36 \cdot 10^{-9}$	$3,61 \cdot 10^{-10}$	$4,42 \cdot 10^{-11}$	$3,44 \cdot 10^{-11}$	$2,07 \cdot 10^{-11}$
3	Коэффициент массоотдачи, м/с	$9,19 \cdot 10^{-7}$	$9,19 \cdot 10^{-7}$	$9,19 \cdot 10^{-7}$	$9,18 \cdot 10^{-7}$	$9,21 \cdot 10^{-7}$
4	Массообменный критерий Фурье	3,172	0,485	0,059	0,046	0,028

Расчеты показывают, что в начальный период времени поток массы вещества максимален, в дальнейшем резко снижается. Резкое изменение всех характеристик массопереноса сменяется вялотекущим процессом, выходящим на экспоненту.

Анализируя изменение потока массы вещества в зависимости от марки портландцемента, можно сделать вывод о том, что при повышении марки портландцемента происходит снижение интенсивности потока массы вещества; аналогичным образом ведут себя коэффициенты массопроводности и массоотдачи.

По данным физико-химических исследований можно предположить, что в рассматриваемой системе при $\tau = 70$ сут. устанавливаются условия, близкие к равновесным [2].

Зная концентрации «свободного гидроксида кальция» в твердой и жидкой фазах в данный момент времени, согласно закону Генри определяем значение константы равновесия – m . Отсюда согласно уравнению (3) получаем значение коэффициента, учитыва-

ющего характеристики фаз, – K_G :

$$-K_G \cdot b \cdot \frac{\partial Z(1, Fo_m)}{\partial x} = \frac{\partial Z_p(Fo_m)}{\partial Fo_m}; \quad (3)$$

$$Z_p(Fo_m) = \frac{C_0 - C_p(\tau)}{C_0},$$

где $K_G = G_B / G_J$ – коэффициент, учитывающий характеристики твердой и жидкой фазы; G_B, G_J – массы бетонного резервуара и жидкости в нем соответственно, кг; $Z_p(x, Fo_m)$ – безразмерная концентрация переносимого компонента по толщине бетона в произвольный момент времени; x – относительная координата; Fo_m – массообменный критерий Фурье; $Z_p(Fo_m)$ – равновесная концентрация переносимого компонента; $C_p(\tau)$ – равновесная концентрация на поверхности твердого тела, кг СаО/кг бетона; C_0 – начальная концентрация свободного СаО, кг СаО/кг бетона.

Результаты расчетов иллюстрирует таблица 4.

Таблица 4

Экспериментально рассчитанные значения m и K_G для образцов цементного камня на портландцементе разных марок

№ п/п	Марка портландцемента	m , кг жидкости/кг бетона	K_G
1	ПЦ 400-Д-0	$0,184 \cdot 10^3$	11,89
2	ПЦ 500-Д-0	$0,213 \cdot 10^3$	13,75
3	ПЦ 550-Д-0	$0,246 \cdot 10^3$	15,93

Экспериментально рассчитанные значения характеристик массопереноса соответствуют данным литературных источников [3, 4].

Проведем расчеты по выражениям (4), (5)

и (6), применяя разработанную нами уточняющую методику [5, 6] для образцов цементного камня на портландцементе разных марок с учетом определенных ранее характеристик процесса массопереноса.

$$Z(\bar{x}, Fo_m) = \frac{Z_p(0)}{1 + K_G b} - 2Bi_m Z_p(0) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos(\mu_m \bar{x})}{\psi'(\mu_m)} \exp(-\mu_m^2 Fo_m) +$$

$$+ 2 \sum_{m=1}^{\infty} \mu_m \cos(\mu_m \bar{x}) \psi(\mu_m, Bi_m, K_G) \int_0^1 Z_0(\xi) \cos(\mu_m \xi) d\xi \cdot \exp(-\mu_m^2 Fo_m); \quad (4)$$

$$Z_{cp}(Fo_m) = \frac{Z_p(0)}{1 + K_G b} - 2Bi_m Z_p(0) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_m}{m \cdot \psi'(\mu_m)} \exp(-\mu_m^2 Fo_m) +$$

$$+ 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\mu_m}{m} \sin \mu_m \cdot \psi(\mu_m, Bi_m, K_G) \int_0^1 Z_0(\xi) \cos(\mu_m \xi) d\xi \cdot \exp(-\mu_m^2 Fo_m); \quad (5)$$

$$Z_p(Fo_m) = Z_p(0) + 2K_G b Z_p(0) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_m}{\psi'(\mu_m)} \cdot [\exp(-\mu_m^2 Fo_m) - 1] -$$

$$- 2K_G b \sum_{m=1}^{\infty} \sin \mu_m \cdot \psi(\mu_m, Bi_m, K_G) \int_0^1 Z_0(\xi) \cos(\mu_m \xi) d\xi [\exp(-\mu_m^2 Fo_m) - 1]. \quad (6)$$

В уравнениях (4)-(6) Bi_m – массообменный критерий Био; μ_m – корни характеристического уравнения; ξ – координата интегрирования в диапазоне $0 \leq \xi \leq x$; m – константа равнове-

сия (Генри), не зависящая от концентрации, кг жидкости / кг бетона.

Результаты расчетов приведены на рисунках 5-7.

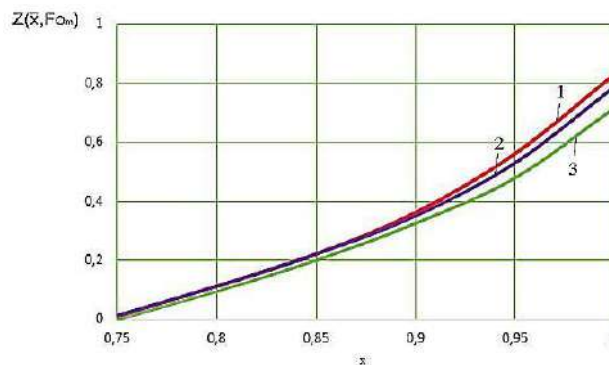


Рис. 5. Профили безразмерных концентраций по толщине бетона с $Fo_m = 0,2$:
1 – для портландцемента марки ПЦ 400-Д-0 при $Bi_m = 23,84$; 2 – для портландцемента марки ПЦ 500-Д-0 при $Bi_m = 23,75$; 3 – для портландцемента марки ПЦ 550-Д-0 при $Bi_m = 23,89$

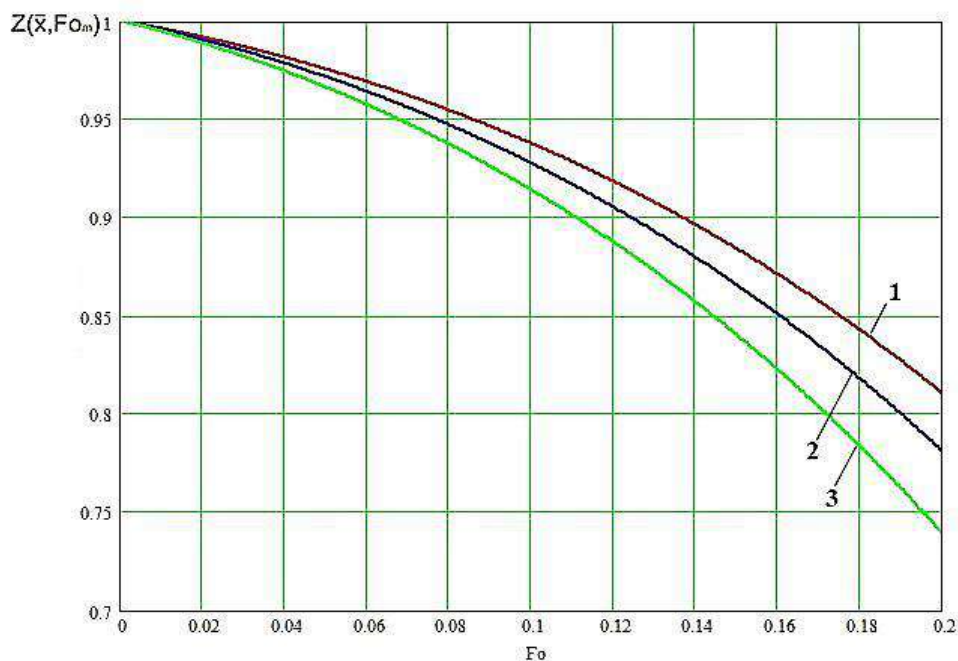


Рис. 6. Кинетика изменения концентрации переносимого компонента в жидкой фазе:

- 1 – для портландцемента марки ПЦ 400-Д-0 при $Bi_m=23,84$;
- 2 – для портландцемента марки ПЦ 500-Д-0 при $Bi_m=23,75$;
- 3 – для портландцемента марки ПЦ 550-Д-0 при $Bi_m=23,89$

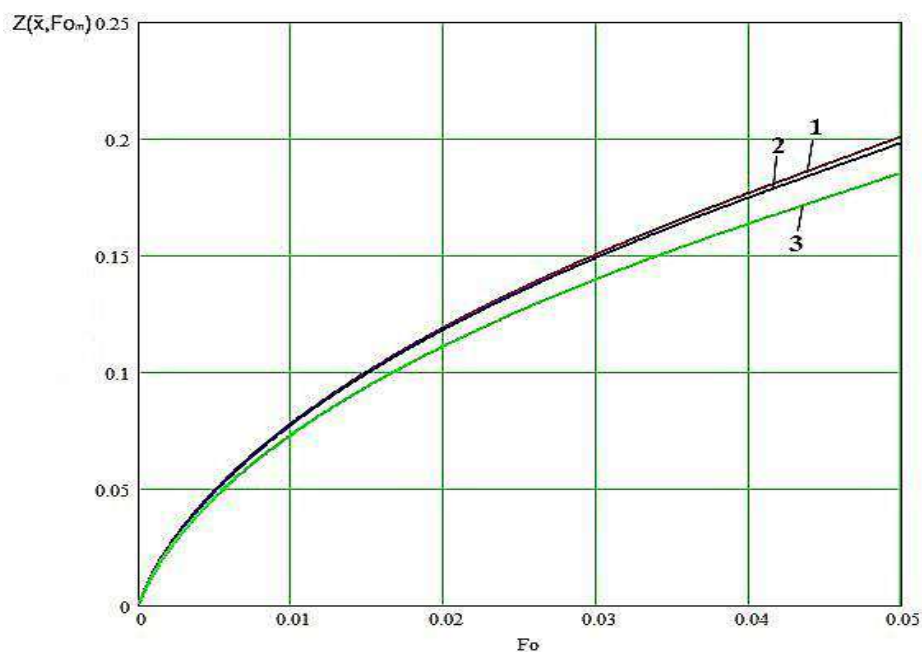


Рис. 7. Кинетика изменения средней безразмерной концентрации в бетоне:

- 1 – для портландцемента марки ПЦ 400-Д-0 при $Bi_m = 23,84$;
- 2 – для портландцемента марки ПЦ 500-Д-0 при $Bi_m = 23,75$;
- 3 – для портландцемента марки ПЦ 550-Д-0 при $Bi_m = 23,89$

Выводы. Анализ результатов проведенных комплексных физико-химических исследований подтверждает принятые ранее модельные представления о характере мас-

сопереноса в рассматриваемой системе «твердое тело – жидкая нейтральная среда» в условиях ограниченного объема жидкой фазы [7], что позволяет рассчитать по разработанной

математической модели характеристики массопереноса «свободного гидроксида кальция» при коррозии цементного бетона первого вида.

Совместный анализ результатов численного (см. рис. 1-3) и натурального (см. рис. 5-7) экспериментов позволяет судить о сходимости

полученных данных, что дает возможность использовать разработанную математическую модель и предложенный метод расчета процесса массопереноса при коррозии первого вида на реальных объектах [8, 9], учитывая марку применяемого портландцемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вопросы прогнозирования долговечности строительных конструкций / С. В. Федосов, В. Е. Румянцева, В. А. Хрунов, М. Е. Шестеркин // Строительство и реконструкция. 2011. № 5 (37). С. 63-70.
2. О некоторых особенностях моделирования массопереноса в процессах коррозии первого вида бетона в замкнутой системе «резервуар-жидкость» / Н. Л. Федосова, В. Е. Румянцева, М. Е. Шестеркин, Ю. В. Манохина // Строительство и реконструкция. 2013. № 1 (45). С. 86-94.
3. Розенталь Н. К. Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости. М.: Федеральное госуд. унитарное предприятие «Центр проектной продукции в строительстве» (ФГУП ЦПП), 2006. 520 с.
4. Никитина Л. М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах. М.: Энергия, 1968. 490 с.
5. Румянцева В. Е., Коновалова В. С., Шестеркин М. Е. Особенности процессов коррозии бетона I вида // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы. SMARTEX – 2015: сб. материалов XVIII Междунар. науч.-практ. форума. Иваново: ИВГПУ, 2015. С. 298-301.
6. Румянцева В. Е., Красильников И. В., Шестеркин М. Е. Теоретические исследования массопереноса при коррозии первого вида цементных бетонов с учетом нелинейности кривой равновесия // Проблемы ресурсо- и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК (ПРЭТ-2014): сб. тр. (секционные доклады) Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. Иваново: ИГХТУ, 2014. Т. 2. С. 149-155.
7. Исследование влияния вида вяжущего на кинетику коррозионных процессов I вида цементных композитов / Н. Л. Федосова, В. Е. Румянцева, М. Е. Шестеркин, М. В. Лосева // Проблемы прочности и долговечности бетона и железобетона: сб. материалов науч.-техн. конф. к 100-летию со дня рождения профессора А.Ф. Полака. Уфа: УГНТУ, 2011. С. 233-237.
8. Экспериментальные исследования процессов массопереноса при жидкостной коррозии цементных бетонов / В. Е. Румянцева, Н. Л. Федосова, В. Л. Смельцов и др. // Приволжский научный журнал. 2010. № 1. С. 39-45.
9. Математические модели для описания коррозии бетонов I и II видов / В. Е. Румянцева, Н. С. Касьяненко, М. Е. Шестеркин, Ю. В. Манохина, В. С. Коновалова // Информационная среда вуза: сб. материалов XXII Междунар. науч.-техн. конф. Иваново: ИВГПУ, 2015. С. 728-735.

Информация об авторах

ФЕДОСОВ Сергей Викторович – академик РААСН, доктор технических наук, профессор, президент и заведующий кафедрой техносферной безопасности Ивановского государственного политехнического университета. Область научных интересов – научные основы разработки процессов, технологии и оборудования для термической обработки строительных материалов. Автор более 400 научных и методических трудов, в том числе 16 монографий и более 10 учебных пособий. E-mail: prezident@ivgpiu.com

ФЕДОСОВА Нина Львовна – кандидат химических наук, профессор, профессор кафедры химии, экологии и микробиологии Ивановского государственного политехнического университета. Автор более 120 публикаций, посвященных вопросам строительной экологии, физики и химии строительных материалов.

РУМЯНЦЕВА Варвара Евгеньевна – советник РААСН, доктор технических наук, доцент, профессор и заведующая кафедрой химии, экологии и микробиологии, директор Института социально-гуманитарных и естественных наук Ивановского государственного политехнического университета. Область научных интересов – коррозия строительных материалов и конструкций; коррозионный массоперенос; прогнозирование долговечности строительных материалов; физика и химия строительных материалов. Автор более 250 печатных работ. E-mail: varryum@gmail.com

КОНОВАЛОВА Виктория Сергеевна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры химии, экологии и микробиологии Ивановского государственного политехнического университета. Предмет научных изысканий – коррозия строительных материалов и конструкций; коррозионный массоперенос; прогнозирование долговечности строительных материалов, физика и химия строительных материалов. Автор 50 публикаций. E-mail: kotprotiv@yandex.ru

ШЕСТЕРКИН Максим Евгеньевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии строительного производства Ивановского государственного политехнического университета. Область научных интересов – коррозия строительных материалов и конструкций; коррозионный массоперенос; прогнозирование долговечности строительных материалов, физика и химия строительных материалов. Имеет 30 опубликованных работ. E-mail: shesterkin86@mail.ru

UDC 691.32:620.193:66.021.3

MODELLING OF KINETICS AND DYNAMICS OF THE MASS TRANSFER BY THE PIECEWISE AND LINEAR APPROXIMATION OF THE CURVE OF EQUILIBRIUM AT LIQUID CORROSION OF THE FIRST TYPE OF CEMENT CONCRETE

Part 2. Realization of the numerical and natural experimentes

***S. V. Fedosov, N. L. Fedosova, V. E. Rumyantseva,
V. S. Konovalova, M. E. Shestyorkin***
Ivanovo State Polytechnic University (Ivanovo)

Abstract. Different types of cements are characterized by different resistance to the action of certain aggressive factors, so the choice of cements for various purposes concrete takes into account not only mechanical performance, but also durability against the aggressive environments in which concrete constructions have to work. The complex research of mass-transfer processes at liquid corrosion of cement concrete with the influence of the properties of Portland cement and the development of mathematical models to predict durability and reliability of building structures is scientifically justified. The work aims to develop the theoretical ideas of processes of liquid corrosion of type I taking into account the influence of properties of Portland cement; determination of the main parameters (the coefficients of mass transfer) for various brands of Portland cement, the study of the kinetics and dynamics of the studied processes. The research into liquid corrosion of concrete of type I with the purpose of approbation of the developed mathematical model of kinetics of transfer of «free calcium hydroxide» has been conducted. The authors carried out a numerical experiment to study the influence of coefficients of the internal and external mass transfer (for various brands of Portland cement) on the kinetics and dynamics of the process corrosion of concrete; designed and carried out the experiment in order to check the adequacy of the proposed mathematical model and the developed engineering calculation method. The analysis of experimental data enabled the authors to obtain the profiles of the concentration of the «free calcium hydroxide» in the thickness of the samples in the water environment. The parameters of mass transfer have been calculated for different brands of Portland cement. The numerical experiment shows the essential dependence of coefficient of a mass conduction on Portland cement brand. Temporary dependences of streams of a transferable target component for different brands of cement which allow to predict the duration of the process of concrete corrosion of type I have been established. The convergence of data obtained as a result of numerical and natural experiments allows to use the developed mathematical model and the method of calculation of the process

of a mass transfer at corrosion of the first type on the real objects, considering the brand of the used Portland cement.

Keywords: mass transfer, liquid corrosion of concrete of the first type, mathematical modeling.

REFERENCES

1. Fedosov S. V., Rumyantseva V. E., Khrunov V. A., Shesterkin M. E. Voprosy prognozirovaniya dolgovechnosti stroitel'nykh konstruksiy [The problems of prediction of durability of building structures], *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [Construction and reconstruction], 2011, No 5 (37), pp. 63-70.
2. Fedosova N. L., Rumyantseva V. E., Shesterkin M. E., Manokhina Yu. V. O nekotorykh osobennostyakh modelirovaniya massoperenosa v protsessakh korrozii pervogo vida betona v zamknutoy sisteme "rezervuar-zhidkost'" [About some features of modeling of a mass transfer in processes of corrosion of the first type of concrete in the closed system "the tank – liquid"], *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [Construction and reconstruction], 2013, No 1 (45), pp. 86-94.
3. Rozental N. K. Korroziionnaya stoykost' tsementnykh betonov nizkoy i osobo nizkoy pronitsaemosti [Corrosion resistance of cement concretes of low and very low permeability], Moscow: Federal'noe gosud. unitarnoe predpriyatie "Tsentr proektnoy produktsii v stroitel'stve" [Federal state unitary enterprise "The Center of Project Products in Construction"] (FGUP TsPP), 2006, 520 p.
4. Nikitina, L. M. Termodinamicheskie parametry i koeffitsienty massoperenosa vo vlazhnykh materialakh [Thermodynamic parameters and coefficients of a mass transfer in wet materials], Moscow: Energiya, 1968, 490 p.
5. Rumyantseva V. E., Konovalova V. S., Shesterkin M. E. Osobennosti protsessov korrozii betona I vida [The features of processes of corrosion of concrete of the I type], *Fizika voloknistykh materialov: struktura, svoystva, naukoemkie tekhnologii i materialy. SMARTEX – 2015: sb. materialov XVIII Mezhdunar. nauch.-prakt. foruma* [Physics of fibrous materials: structure, properties, science intensive technologies and materials. SMARTEX – 2015: materials of XVIII international scientific and practical foruma]. Ivanovo: IVGPU, pp. 298-301.
6. Rumyantseva V. E., Krasil'nikov I. V., Shesterkin M. E. Teoreticheskie issledovaniya massoperenosa pri korrozii pervogo vida tsementnykh betonov s uchetom nelineynosti krivoy ravnovesiya [Theoretical research of a mass transfer at corrosion of the first type of cement concrete taking into account nonlinearity of a curve of equilibrium], *Problemy resurso- i energosberegayushchikh tekhnologiy v promyshlennosti i APK (PRET-2014): sb. tr. (seksionnye doklady) Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.: v 2 t.* [Problems of resource-and energy saving technologies in the industry and agro-industrial complex: materials (section reports) of the International scientific and technical conference in 2 volumes], Ivanovo: ISUCT, 2014. Vol. 2, pp. 149-155.
7. Fedosova N. L., Rumyantseva V. E., Shesterkin M. E., Loseva M. V. Issledovanie vliyaniya vida vyazhushchego na kinetiku korroziionnykh protsessov I vida tsementnykh kompozitov [A study of the influence of the type of binding agent on the kinetics of corrosion processes of the I type of cement composites], *Problemy prochnosti i dolgovechnosti betona i zhelezobetona: sb. materialov nauch.-tekhn. konf. k 100-letiyu so dnya rozhdeniya professora A.F. Polaka* [Problems of strength and durability of concrete and reinforced concrete: materials of the scientific and technical conference to the 100th anniversary from the birthday of Professor A.F. Pollack], Ufa: UGNTU, 2011, pp. 233-237.
8. Rumyantseva V. E., Fedosova N. L., Smel'tsov V. L., etc. Eksperimental'nye issledovaniya protsessov massoperenosa pri zhidkostnoy korrozii tsementnykh betonov [Experimental studies of a mass transfer processes at liquid corrosion of cement concrete], *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [The Privolzhsky scientific journal], 2010, No 1, pp. 39-45.
9. Rumyantseva V. E., Kas'yanenko N. S., Shesterkin M. E., Manokhina Yu. V., Konovalova V. S. Matematicheskie modeli dlja opisaniya korrozii betonov I i II vidov [Mathematical models to describe the corrosion of concretes of the I and II types], *Informatsionnaya sreda vuza: sb. materialov XXII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [The information environment of the University: materials of XXII international scientific and technical conference], Ivanovo: IVGPU, 2015, pp. 728-735.

Information about the authors

FEDOSOV Sergey Viktorovich – Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, President and Head of the Department of Technosphere Safety of Ivanovo State Polytechnic University. Research interests – scientific bases of development of processes, technology and equipment for heat treatment of

building materials. Author of over 400 scientific and methodical works, including 16 monographs and more than 10 education guidances. E-mail: prezident@ivgpu.com

FEDOSOVA Nina Lvovna – Candidate of Chemical Sciences, Professor of the Department of Chemistry, Ecology and Microbiology of Ivanovo State Polytechnic University. Research interests – construction ecology, physics and chemistry of building materials. Author of over 120 publications.

RUMYANTSEVA Varvara Evgenevna – Adviser of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Chemistry, Ecology and Microbiology, Director of the Institute of Social-Humanitarian and Natural Sciences of Ivanovo State Polytechnic University. Research interests – corrosion of construction materials and structures, corrosion mass transfer, prediction of durability of building materials, physics and chemistry of building materials. Author of over 250 publications. E-mail: varrym@gmail.com

KONOVALOVA Viktoriya Sergeevna – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Chemistry, Ecology and Microbiology of Ivanovo State Polytechnic University. Research interests – corrosion of construction materials and structures, corrosion mass transfer, prediction of durability of building materials, physics and chemistry of building materials. Author of 50 publications. E-mail: kotprotiv@yandex.ru.

SHESTYERKIN Maksim Evgenyevich – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Technology of Building Production of Ivanovo State Polytechnic University. Research interests – corrosion of construction materials and structures, corrosion mass transfer, prediction of durability of building materials, physics and chemistry of building materials. Author of 30 publications. E-mail: shesterkin86@mail.ru

Библиографическая ссылка

Моделирование кинетики и динамики массопереноса при жидкостной коррозии первого вида цементного бетона кусочно-линейной аппроксимацией кривой равновесия. Часть 2. Реализация численного и натурального эксперимента / С. В. Федосов, Н. Л. Федосова, В. Е. Румянцева, В. С. Коновалова, М. Е. Шестеркин // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2017. – № 4. – С. 8-17.