

УДК 666.972.16:66.018.8

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ БЕТОНА,
СОДЕРЖАЩЕГО ГИДРОФОБИЗИРУЮЩИЕ ДОБАВКИ**

**DETERMINATION OF SAFE SERVICE LIFE
OF STRUCTURES MADE OF CONCRETE
CONTAINING HYDROPHOBIC ADDITIVES**

С.В. ФЕДОСОВ, В.Е. РУМЯНЦЕВА, И.В. КРАСИЛЬНИКОВ, В.С. КОНОВАЛОВА, И.В. КАРАБАЕВ
S.V. FEDOSOV, V.E. RUMYANTSEVA, I.V. KRASILNIKOV, V.S. KONOVALOVA, I.V. KARAVAEV

(Ивановский государственный политехнический университет)
(Ivanovo State Polytechnical University)

E-mail: fedosov-academic53@mail.ru, varrym@gmail.com, korasb@mail.ru,
kotprotiv@yandex.ru, ivakaa@gmail.com

В работе приведены данные о коррозионном массопереносе в системе "жидкая агрессивная среда – бетон". Приводятся рекомендации по гидрофобизации бетонов посредством введения добавки – стеарат кальция. Представлена математическая модель для расчета характеристик массопереноса при жидкостной коррозии бетонов II вида. Рассчитаны коэффициенты массоотдачи и массопроводности для исследуемых сред, позволяющие определить срок безопасной эксплуатации конструкций из гидрофобизированного бетона.

The paper presents data on corrosion mass transfer in the system "liquid aggressive environment – concrete". Recommendations about a water repellency treatment of concrete by means of the introduction of additives calcium stearate are provided. The mathematical model for calculation of characteristics of a mass transfer at liquid corrosion of concrete of the II type is presented. The coefficients of a mass transfer for the studied environments, which allow to determine the term of safe operation of designs from concrete with hydrophobic additives, are calculated.

Ключевые слова: жидкостная коррозия, коррозия бетона II вида, гидрофобизирующие добавки, агрессивная среда, массоперенос, характеристики массопереноса.

Keywords: liquid corrosion, corrosion of concrete of the II type, hydrophobic additives, aggressive environment, mass transfer, characteristics of a mass transfer.

Поскольку долговечность изделий из бетона, армированного композитной арматурой, определяется скоростью коррозионных процессов, протекающих в бетоне, на начальном этапе проведены исследования жидкостной коррозии цементного камня.

Изначально бетон, как и большинство строительных материалов, гидрофилен. Гидрофильность бетона – первооснова всех разрушительных процессов, возможных в нем [1].

Уменьшив количество воды, способной проникать в бетон, можно значительно увеличить долговечность бетона [2].

По классификации Н.А. Мощанского [3] в зависимости от происхождения поры и другие неплотности в цементном камне и бетоне можно разделить на следующие виды: поры геля; размер их колеблется в пределах от 25 до 1000 Å (0,0025...0,1 мкм); поры эти в основном замкнутые; капиллярные поры, образующиеся в результате испарения и миграции влаги. Размер их колеблется в довольно широких пределах – от 0,1 мкм и менее (микрокапилляры) до 10...50 мкм (макрокапилляры); эти поры в основном открытые и сообщающиеся между собой; открытые трещины и микротрещины температурно-усадочного происхождения. Толщина их может достигать нескольких мм; воздушные поры, образовавшиеся в результате преднамеренного вовлечения воздуха в бетонную смесь при приготовлении ячеистых бетонов, применения воздухововлекающих добавок при приготовлении и укладке бетонной смеси. При выдерживании в воде гелевые поры заполняются полностью, а капиллярные – почти полностью, так как в них вовлекается некоторое количество воздуха. Воздушные же поры остаются полностью заполненными воздухом [4].

Как известно [1], степень водопоглощения бетона оценивается количеством воды в %, удерживаемым бетонным образцом и отнесенным к объему или весу образца. При насыщении бетона водой существенно изменяются его физико-механические и структурные свойства: увеличиваются линейные размеры, плот-

ность и теплопроводность, происходят структурные изменения в материале.

Для уменьшения водопоглощения прибегают к гидрофобизации бетона. Гидрофобизирующие добавки придают стенкам пор и капилляров в бетоне гидрофобные свойства. Наиболее известными химическими добавками среди водоотталкивающих материалов являются соли жирных кислот, например, стеараты и олеаты щелочных и щелочно-земельных металлов. При использовании таких добавок в результате реакции мыла со "свободным гидроксидом кальция" образуется нерастворимый стеарат кальция, который закрывает поверхность пор [5].

Благодаря снижению водопоглощения уменьшается количество поступающей внутрь бетона агрессивной среды, а, значит, понижается степень коррозионного разрушения цементного камня. Коррозионная стойкость цементного камня с гидрофобизирующими добавками требует дополнительных исследований для определения закономерностей массопереноса.

Исследования проводили на образцах-таблетках диаметром 50 мм и толщиной 5 мм (рис. 1 – схема образца для испытаний на коррозионную стойкость), изготовленных из портландцемента марки ПЦ 500-Д0 с водоцементным соотношением В/Ц = 0,3. Характеристики цементных образцов приведены в табл. 1. Марка цемента по водонепроницаемости W4, W6, W8 регулировалась гидрофобизирующей добавкой стеаратом кальция. Было установлено, что марке бетона W4 соответствует концентрация гидрофобизатора в количестве 0,3% по массе бетона, марке бетона W6 – 0,5 %, марке бетона W8 – 0,7 %.

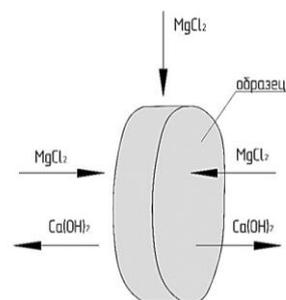


Рис. 1

Т а б л и ц а 1

Марка бетона по водонепроницаемости	Начальная концентрация $\text{Ca}(\text{OH})_2$, C_0 , кг $\text{CaO}/\text{кг бет.}$	Плотность ρ_w , кг/м ³	Истинная плотность ρ , кг/м ³	Водопоглощение W_m , %	Полный объем пор P_p , %
W4	3,62 · 10 ⁻⁴	2220,1	2631,6	5,0	15,6
W6		2260,7	2637,2	4,5	14,3
W8		2332,1	2644,4	4,2	11,8

Исследования коррозионной стойкости цементного камня проводили [6] на установке для исследования массообменных процессов, описанной в патенте РФ № 71164. Образцы погружались в водные растворы MgCl_2 объемом 3000 см³, разных

концентраций, приведенных в табл. 2, откуда с периодичностью в 7 суток отбирались пробы для титрования объемом 10 см³. Концентрация раствора корректировалась во времени. На момент погружения возраст образцов достиг 28 суток.

Т а б л и ц а 2

Концентрация растворенного вещества, г/л	pH	Плотность, кг/м ³
6	6	1002,2
7,5	5,9	1004,5
9	5,8	1006,2
11,5	5,7	1008,1
14	5,5	1009,8
16,5	5,4	1011,3
18	5,3	1012,7
19,5	5,1	1013,1
21	5	1014,4

Концентрацию агрессивной среды приняли в соответствии с ГОСТ 27677–88 "Защита от коррозии в строительстве. Бетоны. Общие требования к проведению испытаний", как допускаемую для агрессивных сред концентрацию по разной сте-

пени агрессивности жидкой неорганической среды (слабоагрессивная, среднеагрессивная, сильноагрессивная) (табл. 3 – степень агрессивного воздействия MgCl_2 на портландцемент).

Т а б л и ц а 3

Марка бетона по водонепроницаемости	Содержание MgCl_2 , г/л		
	слабоагрессивная среда	среднеагрессивная среда	сильноагрессивная среда
W4	6	9	>14
W6	9	14	>18
W8	14	18	>21

В ходе проведения опыта установлено, что состояние, близкое к равновесной концентрации катионов кальция в растворе, достигается после 14 суток пребывания образца в коррозионной среде (рис. 2...4) [6], тогда как для образцов без гидрофобизирующих добавок состояние равновесия наступает после 50 суток [7]. После достижения равновесия в растворе изменения концентрации не происходит вследствие затрудненности проникания коррозионной среды вглубь бетона.

Нам рис. 2 представлены кинетические кривые концентрации катионов кальция в растворе MgCl_2 разной концентрации образцов из цемента марки по водонепроницаемости W4; на рис. 3 – кинетические кривые концентрации катионов кальция в растворе MgCl_2 разной концентрации образцов из цемента марки по водонепроницаемости W6; на рис. 4 – кинетические кривые концентрации катионов кальция в растворе MgCl_2 разной концентрации образцов из цемента марки по водонепроницаемости W8.

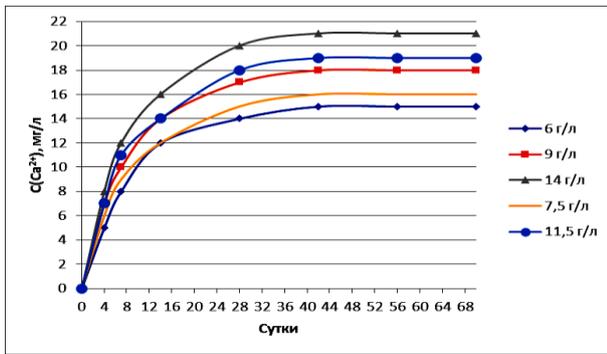


Рис. 2

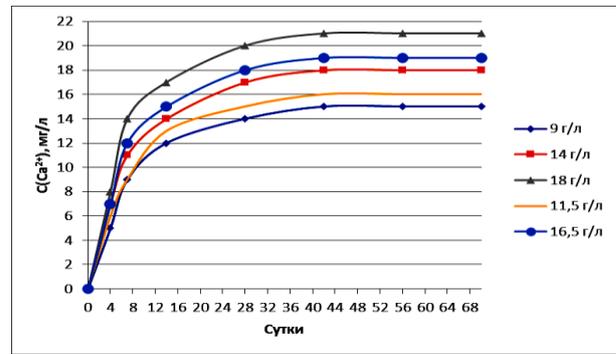


Рис. 3

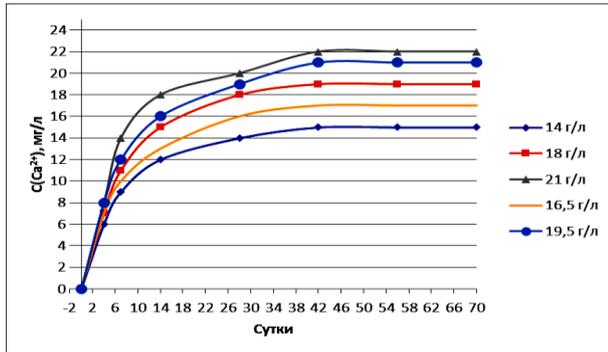


Рис. 4

Из рис. 2 видно, что кинетическая кривая концентрации катионов кальция для образцов из цемента марки по водонепроницаемости W4 в растворе $MgCl_2$ с концентрацией 7,5 г/л лежит ближе к кривой, соответствующей слабоагрессивной среде ($C(MgCl_2) = 6$ г/л), а в растворе $MgCl_2$ с концентрацией 11,5 г/л лежит ближе к кривой, соответствующей среднеагрессивной среде ($C(MgCl_2) = 9$ г/л).

Из рис. 3 видно, что кинетическая кривая концентрации катионов кальция для образцов из цемента марки по водонепроницаемости W6 в растворе $MgCl_2$ с концентрацией 11,5 г/л лежит ближе к кривой, соответствующей слабоагрессивной среде ($C(MgCl_2) = 9$ г/л), а в растворе $MgCl_2$ с концентрацией 16,5 г/л лежит ближе к кривой, соответствующей среднеагрессивной среде ($C(MgCl_2) = 14$ г/л).

Из рис. 4 видно, что кинетическая кривая концентрации катионов кальция для образцов из цемента марки по водонепроницаемости W8 в растворе $MgCl_2$ с концентрацией 16,5 г/л лежит ближе к кривой, соответствующей слабоагрессивной среде

($C(MgCl_2) = 14$ г/л), а в растворе $MgCl_2$ с концентрацией 19,5 г/л лежит ближе к кривой, соответствующей среднеагрессивной среде ($C(MgCl_2) = 18$ г/л).

Результаты исследований показывают, что рекомендации, представленные в ГОСТ 27677–88, имеют условный характер. Поэтому для их использования на практике необходимо проводить предварительные испытания для конкретных марок бетона, чтобы определить диапазон концентраций в зависимости от степени агрессивности среды.

Из рис. 2...4 видно, что равновесное значение концентрации катионов кальция для бетонов различных марок примерно одинаково для одного типа агрессивности среды. Таким образом, зная степень агрессивности среды (концентрацию хлорид-ионов), можно определить оптимальное количество гидрофобизирующей добавки, достаточное для предотвращения коррозионных разрушений в бетоне.

Для концентраций $MgCl_2$ менее 9 г/л достаточно концентрации гидрофобизирующей добавки 0,3 % от массы бетона, что соответствует марке по водонепроницаемости W4.

Для концентрации 9...16,5 г/л достаточно концентрации гидрофобизирующей добавки 0,5 % от массы бетона, что соответствует марке по водонепроницаемости W6.

Для концентраций выше 16,5 г/л концентрация гидрофобизирующей добавки должна составлять не менее 0,7 % от массы бетона, что соответствует марке по водонепроницаемости W8.

Модельные представления о характере процесса массопереноса в исследуемой

системе "твердое тело – жидкая агрессивная среда" [8...10], которые были приняты ранее, подтверждаются анализом результатов проведенных комплексных физико-химических исследований, что позволяет провести расчет по разработанной в рамках научной школы академика РААСН С.В. Федосова математической модели (1)

$$\theta(\bar{x}, Fo_m) = -\frac{Ki_m^*}{6}(6Fo_m + 3\bar{x}^2 - 1) + \frac{2Ki_m^*}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \cos(\pi n \bar{x}) \exp(-\pi^2 n^2 Fo_m) + \int_0^1 \theta_0(\xi) d\xi + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\pi n \bar{x}) \int_0^1 \theta_0(\xi) \cos(\pi n \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 n^2 Fo_m) + \left(Fo_m + \frac{3\bar{x}^2 + 2}{6} \right) \times \int_0^1 Po_m^*(\xi) d\xi - \int_0^1 Po_m^*(\xi) \xi d\xi + \frac{1}{2} \int_0^1 Po_m^*(\xi) \xi^2 d\xi - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cos(\pi n \bar{x}) \times \int_0^1 Po_m^*(\xi) \cos(\pi n \xi) d\xi \exp(-\pi^2 n^2 Fo_m). \quad (1)$$

Здесь n – число членов ряда; ξ – координата интегрирования в диапазоне $0 \leq \xi \leq \bar{x}$; $Ki_m^* = \frac{q_n \delta}{k C_0 \rho_b}$ – модифицированный критерий Кирпичева; $Fo_m = \frac{k \tau}{\delta^2}$ – массообменный критерий Фурье; $\bar{x} = \frac{x}{\delta}$ – безразмерная координата; $\theta(\bar{x}, Fo_m) = \frac{C(x, \tau) - C_0}{C_0}$ – безразмерная концентрация; $Po_m^*(\bar{x}) = \frac{q_v(x) \delta^2}{k C_0 \rho_b}$ – модифицированный критерий Померанцева.

По выражению (1) осуществлен расчет профилей концентраций "свободного

[11...14] характеристик процесса массопереноса "свободного гидроксида кальция" при коррозии бетона второго вида в результате воздействия выбранных агрессивной среды: 2 %-ного водного раствора $MgCl_2$ в соответствии с известными методиками расчета [15], [16].

гидроксида кальция" по толщине цементобетонного образца, подвергнутого воздействию 2%-ного водного раствора $MgCl_2$ на разных этапах проведения эксперимента для марок бетона по водонепроницаемости W6 (рис. 5 – профили концентраций "свободного гидроксида кальция" по толщине бетонного образца маркой по водонепроницаемости W6 в безразмерных координатах (а) и в координатах с реальными физическими размерами(б)) и W8 (рис. 6 – профили концентраций "свободного гидроксида кальция" по толщине бетонного образца маркой по водонепроницаемости W8 в безразмерных координатах (а) и в координатах с реальными физическими размерами(б)).

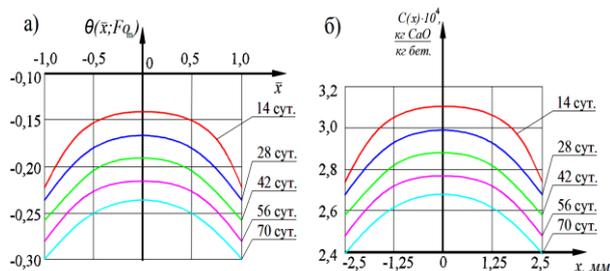


Рис. 5

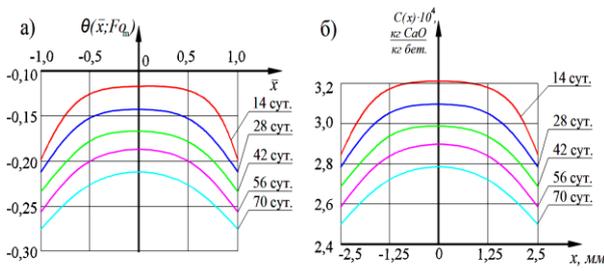


Рис. 6

Анализ полученных профилей концентраций "свободного гидроксида кальция" по толщине образца цементного камня в водной солевой среде [14] позволяет определить градиенты концентраций переносимого компонента на границе раздела фаз и рассчитать по формуле (2) [17], [18] значения коэффициентов массопроводности k для разных сред:

$$k = \frac{q}{\rho_0 \frac{dC}{dx}}, \quad (2)$$

где q – плотность потока массы вследствие химических реакций, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; ρ_0 – плотность твердой фазы, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Плотность потока массы вещества q из цементного камня в жидкую среду рассчитывается по уравнению:

$$q = \frac{\Delta C_{\text{ж}}}{S \tau}, \quad (3)$$

где $\Delta C_{\text{ж}}$ – масса вещества, перешедшего из цементного камня в жидкую среду, кг .

Для расчета процессов переноса вещества удобно вводить коэффициент массоотдачи β . Он определяется как отношение диффузионного потока к разности концентраций:

$$\beta = \frac{q}{\Delta C}, \quad (4)$$

где ΔC – разность концентраций, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Результаты расчетов сведены в табл. 4 – экспериментально рассчитанные характеристики массопереноса.

Т а б л и ц а 4

Для системы "2 %-ный водный раствор MgCl_2 – цементный бетон марки по водонепроницаемости W6"						
№ п/п	Наименование показателя	τ , сут.				
		14	28	42	56	70
1	Плотность потока "свободного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ " в образце, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$5,34 \cdot 10^{-8}$	$3,14 \cdot 10^{-8}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$1,65 \cdot 10^{-8}$	$1,32 \cdot 10^{-8}$
2	Плотность потока Mg^{2+} в жидкости, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$6,86 \cdot 10^{-8}$	$4,03 \cdot 10^{-8}$	$2,82 \cdot 10^{-8}$	$2,12 \cdot 10^{-8}$	$1,69 \cdot 10^{-8}$
3	Коэффициент массоотдачи, $\text{м}/\text{с}$	$7,03 \cdot 10^{-7}$	$4,13 \cdot 10^{-7}$	$2,89 \cdot 10^{-7}$	$2,17 \cdot 10^{-7}$	$1,74 \cdot 10^{-7}$
4	Коэффициент массопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$	$5,9 \cdot 10^{-9}$	$4,63 \cdot 10^{-9}$	$3,89 \cdot 10^{-9}$	$3,65 \cdot 10^{-9}$	$3,5 \cdot 10^{-9}$
Для системы "2 %-ный водный раствор MgCl_2 – цементный бетон марки по водонепроницаемости W8"						
№ п/п	Наименование показателя	τ , сут.				
		14	28	42	56	70
1	Плотность потока "свободного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ " в образце, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$5,65 \cdot 10^{-8}$	$3,14 \cdot 10^{-8}$	$2,3 \cdot 10^{-8}$	$1,73 \cdot 10^{-8}$	$1,38 \cdot 10^{-8}$
2	Плотность потока Mg^{2+} в жидкости, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$7,25 \cdot 10^{-8}$	$4,03 \cdot 10^{-8}$	$2,95 \cdot 10^{-8}$	$2,29 \cdot 10^{-8}$	$1,77 \cdot 10^{-8}$
3	Коэффициент массоотдачи, $\text{м}/\text{с}$	$7,15 \cdot 10^{-7}$	$3,98 \cdot 10^{-7}$	$2,91 \cdot 10^{-7}$	$2,19 \cdot 10^{-7}$	$1,75 \cdot 10^{-7}$
4	Коэффициент массопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$	$6,06 \cdot 10^{-9}$	$4,49 \cdot 10^{-9}$	$3,95 \cdot 10^{-9}$	$3,82 \cdot 10^{-9}$	$3,55 \cdot 10^{-9}$

Описанные выше экспериментальные данные, внедренные для применения в математические модели процессов коррозии цементных бетонов 2 вида, позволят прогнозировать динамику массообменных процессов в теле бетонных и железобетонных конструкций [9], [18]. В качестве наглядного примера расчета долговечно-

сти по полученным данным на рис. 7 (профили концентраций "свободного гидроксида кальция" по толщине железобетонной стенки с маркой по водонепроницаемости W8 в безразмерных координатах (а) и в координатах с реальными физическими размерами(б)) представлены результаты расчета полей концентраций

"свободного гидроксида кальция" железобетонной подпорной стенки морского причала толщиной 400 мм из бетона с маркой по водонепроницаемости W8.

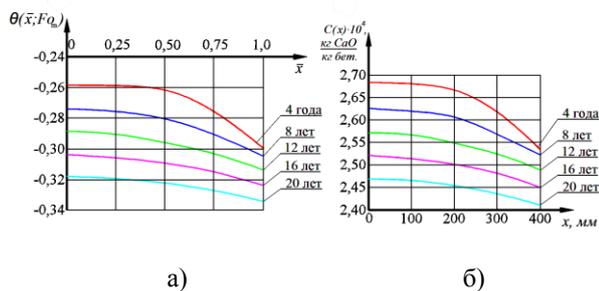


Рис. 7

По построенным профилям концентраций "свободного гидроксида кальция" видно, что уже через 12 лет эксплуатации стенки в морской воде в слоях бетона, близко расположенных к агрессивной среде, начинается разложение высокоосновных соединений цементного бетона: алита, белита, трехкальциевого алюмината и четырехкальциевого алюмоферрита. Затем к 16 годам эксплуатации разложение высокоосновных соединений идет по всей толщине железобетонной стенки, а к 20 годам концентрация "свободного гидроксида кальция" становится такой, что прочность бетона будет крайне низкая и не сможет обеспечить дальнейшую безопасную эксплуатацию конструкции. Тогда как в бетоне без гидрофобизирующих добавок разложение высокоосновных составляющих цементного камня начинается через 2,5 года воздействия среды [9].

ВЫВОДЫ

1. Ресурс безопасной эксплуатации конструкций из бетона, подверженного переменному или постоянному воздействию жидкой агрессивной среды, напрямую зависит от скорости происходящих массообменных процессов в системе "жидкая агрессивная среда – бетон". Введение гидрофобизирующих добавок позволяет снизить водопоглощение, а значит уменьшить количество поступающей внутрь бетона агрессивной среды и сни-

зить степень коррозионного разрушения цементного камня.

2. Проведенные исследования коррозионной стойкости цементного камня с гидрофобизирующими добавками при помощи математического моделирования позволили определить параметры массопереноса (коэффициенты массопроводности и массоотдачи) и установить сроки безопасной эксплуатации конструкций из бетона в различных агрессивных средах. Внедрение полученных характеристик процесса коррозии второго вида цементных бетонов из различных марок по водопоглощению совместно с ранее разработанными математическими моделями в нормативные документы по защите от коррозии строительных конструкций (СНиП и ГОСТ) позволят рационально назначать первичные и вторичные средства защиты от коррозии и тем самым увеличивать срок службы изделий и конструкций из бетона.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Баженов Ю.М.* Технология бетона. – М.: АСВ, 2002.
2. *Федосов С.В., Базанов С.М.* Сульфатная коррозия бетона. – М.: АСВ, 2003.
3. *Моцанский Н.А.* Повышение стойкости строительных материалов и конструкций, работающих в условиях агрессивных сред. – М.: Госстройиздат, 1962.
4. *Зоткин А.Г.* Бетоны с эффективными добавками. – М.: Инфра-Инженерия, 2014.
5. *Рамачандран В.С., Фельдман Р.Ф., Коллепарди М.* Добавки в бетон / Под ред. В.С. Рамачандрана; Пер с англ. Т.И. Розенберг и С.А. Болдырева; Под ред. А.С. Болдырева и В.Б. Ратинова. – М.: Стройиздат, 1988.
6. *Федосов С.В., Румянцева В.Е., Коновалова В.С., Караваев И.В.* Жидкостная коррозия бетонов в среде с различной степенью агрессивности // Вестник гражданских инженеров. – 2017, № 4 (63). С. 113...118.
7. *Румянцева В.Е., Караваев И.В., Коновалова В.С., Логинова С.А.* Коррозия бетона с гидрофобизирующими добавками // Повышение эффективности процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности / Сб. научн. тр. Междунар. научн.-техн. конф., посвященной 105-летию со дня рождения А.Н. Плановского. – М.: МГУДТ, 2016. Т. 2. С. 138...141.
8. *Румянцева В.Е., Коновалова В.С., Виталова Н.М.* Ингибирование коррозии железобетонных конструкций // Строительство и реконструкция. – 2014, №4 (54). С. 65...71.

9. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Касьяненко Н.С. Математическое моделирование массопереноса в процессах коррозии бетона второго вида // Строительные материалы. – 2008, № 7. С. 35...39.

10. Румянцева В.Е. Математическое моделирование массопереноса, лимитированного внутренней диффузией в процессах коррозии бетона первого и второго видов // Строительные материалы. – 2009, № 2. С. 22...25.

11. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Хрунов В.А., Касьяненко Н.С., Смелцов В.Л. Прогнозирование долговечности строительных конструкций с позиций расчетного и экспериментального исследования процессов коррозии бетона // Вестник Волгоградского гос. архитектур.-строит. ун-та. Серия: Строительство и архитектура. – 2009, № 14. С.117...122.

12. Федосов С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. – Иваново: ИПК ПресСто, 2010.

13. Fedosov S.V., Romyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Narmania B.E. Formulation of mathematical problem describing physical and chemical processes at concrete corrosion // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – Vol.13, № 2, 2017. С. 45...49.

14. Федосов С.В., Грузинцева Н.А., Лысова М.А., Гусев Б.Н. Комплексная оценка конкурентных преимуществ предприятия по производству строительных материалов // Изв. вузов. Строительство. – 2015, № 3 (675). С. 46...51.

15. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Касьяненко Н.С., Красильников И.В. Нестационарный массоперенос в процессах коррозии второго вида цементных бетонов, малые значения чисел Фурье, с внутренним источником массы // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2015. Т. 58, № 1. С.97...99.

16. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Касьяненко Н.С. Массоперенос в процессах жидкостной коррозии второго вида цементных бетонов, контролируемый диффузионно-кинетическим сопротивлением // Строительные материалы. – 2011, №1. С. 50...53.

17. Румянцева В.Е., Смелцов В.Л., Федосова Н.Л., Хрунов В.А., Костерин А.Я. Экспериментальные исследования процессов массопереноса при жидкостной коррозии цементных бетонов // Приволжский научный журнал. – 2010, № 1. С. 39...45.

18. Каюмов Р.А., Федосов С.В., Румянцева В.Е., Хрунов В.А., Манохина Ю.В., Красильников И.В. Математическое моделирование коррозионного массопереноса гетерогенной системы "жидкая агрессивная среда – цементный бетон". Частные случаи решения // Изв. КГАСУ. – 2013, №4 (26). С.343...348.

REFERENCES

1. Bazhenov Yu.M. Tekhnologiya betona. – М.: ASV, 2002.

2. Fedosov S.V., Bazanov S.M. Sul'fatnaya korroziya betona. – М.: ASV, 2003.

3. Moshchanskij N.A. Povyshenie stojkosti stroitel'nyh materialov i konstrukcij, rabotayushchih v usloviyah agressivnyh sred. – М.: Gosstrojizdat, 1962.

4. Zotkin A.G. Betony s ehffektivnymi dobavkami. – М.: Infra-Inzheneriya, 2014.

5. Ramachandran V.S., Fel'dman R.F., Kolleparadi M. Dobavki v beton / Pod red. V.S. Ramachandrana; Per s angl. T.I. Rozenberg i S.A. Boldyreva; Pod red. A.S. Boldyreva i V.B. Ratinova. – М.: Strojizdat, 1988.

6. Fedosov S.V., Romyanceva V.E., Konovalova V.S., Karavaev I.V. Zhidkostnaya korroziya betonov v srede s razlichnoj stepen'yu agressivnosti // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. – 2017, № 4 (63). S.113...118.

7. Romyanceva V.E., Karavaev I.V., Konovalova V.S., Loginova S.A. Korroziya betona s gidrofobiziruyushchimi dobavkami // Povyshenie ehffektivnosti processov i apparatov v himicheskoy i smezhnyh otraslyah promyshlennosti / Sb. nauchn. tr. Mezhdunar. nauchn.-tekhn. konf., posvyashchennoj 105-letiyu so dnya rozhdeniya A.N. Planovskogo. – М.: MGUDT, 2016. Т. 2. С. 138...141.

8. Romyanceva V.E., Konovalova V.S., Vitalova N.M. Ingibirovanie korrozii zhelezobetonnyh konstrukcij // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. – 2014, №4 (54). S. 65...71.

9. Fedosov S.V., Romyanceva V.E., Kas'yanenko N.S. Matematicheskoe modelirovanie massoperenosa v processah korrozii betona второго вида // Stroitel'nye materialy. – 2008, № 7. С. 35...39.

10. Romyanceva V.E. Matematicheskoe modelirovanie massoperenosa, limitirovannogo vnutrennej diffuziej v processah korrozii betona первого и второго видов // Stroitel'nye materialy. – 2009, № 2. С. 22...25.

11. Fedosov S.V., Romyanceva V.E., Hrunov V.A., Kas'yanenko N.S., Smel'cov V.L. Prognozirovanie dolgovechnosti stroitel'nyh konstrukcij s pozicij raschetnogo i ehksperimental'nogo issledovaniya processov korrozii betona // Vestnik Volgogradskogo gos. arhitekt.-stroit. un-ta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura. – 2009, № 14. S.117...122.

12. Fedosov S.V. Teplomassoperenos v tekhnologicheskikh processah stroitel'noj industrii. – Ivanovo: IPK PresSto, 2010.

13. Fedosov S.V., Romyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Narmania B.E. Formulation of mathematical problem describing physical and chemical processes at concrete corrosion // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – Vol.13, № 2, 2017. С. 45...49.

14. Федосов С.В., Грузинцева Н.А., Лысова М.А., Гусев Б.Н. Комплексная оценка конкурентных преимуществ предприятия по производству строительных материалов // Изв. вузов. Строител'stvo. – 2015. № 3 (675). С. 46...51.

15. Fedosov S.V., Romyanceva V.E., Kas'yanenko N.S., Krasil'nikov I.V. Nestacionarnyj massoperenos v processah korrozii второго вида cementnyh betonov, malye znacheniya chisel Fur'e, s vnutrennim istochnikom massy // Izv. vuzov. Himiya i himicheskaya tekhnologiya. – 2015, Т. 58, № 1. С.97...99.

16. Fedosov S.V., Rumyancheva V.E., Kas'yanenko N.S. Massoperenos v processah zhidkostnoj korrozii vtorogo vida cementnyh betonov, kontroliruemij diffuzionno-kineticheskim soprotivleniem // Stroitel'nye materialy. – 2011, №1. S. 50...53.

17. Rumyancheva V.E., Smel'cov V.L., Fedosova N.L., Hrunov V.A., Kosterin A.Ya. Eksperimental'nye issledovaniya processov massoperenosa pri zhidkostnoj korrozii cementnyh betonov // Pri-volzhskij nauchnyj zhurnal. – 2010, № 1. S. 39...45.

18. Kayumov R.A., Fedosov S.V., Rumyancheva V.E., Hrunov V.A., Manohina Yu.V., Krasil'nikov I.V. Matematicheskoe modelirovanie korroziionnogo massoperenosa geterogennoj sistemy "zhidkaya agressivnaya sreda – cementnyj beton". Chastnye sluchai resheniya // Izv. KGASU. – 2013, №4 (26). S.343...348.

Рекомендована кафедрой химии, экологии и микробиологии. Поступила 09.10.17.
