Строительные материалы и изделия

УДК 693.54

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-4-134-143

© Е. В. Королев, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: ekorolev@lan.spbgasu.ru

© А. Н. Гришина, канд. техн. наук, с. н. с.
(Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет,
Москва, Россия)

E-mail: GrishinaAN@mgsu.ru

© А. В. Михеев, начальник управления
(ООО «Трансстроймеханизация», Москва, Россия)

E-mail: mikheev@tsm-msk.ru

© В. А. Гладких, директор НИИИЦ МГСУ СТРОЙ-ТЕСТ
(Национальный исследовательский Московский
государственный строительный университет,
Москва, Россия)

E-mail: GladkikhVA@mgsu.ru

© E. V. Korolev, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: ekorolev@lan.spbgasu.ru

© A. N. Grishina, PhD in Sci. Tech., senior researcher
(National Research Moscow State
University of Civil Engineering,
Moscow, Russia)

E-mail: GrishinaAN@mgsu.ru

© A. V. Mikheev, Head of Department
(LLC "Transstroymekhanizaciya", Moscow, Russia)

E-mail: mikheev@tsm-msk.ru

© V. A. Gladkikh, director NIIITs MGSU STROY-TEST
(National Research Moscow State
University of Civil Engineering,
Moscow, Russia)

E-mail: GladkikhVA@mgsu.ru

ВЛАЖНОСТНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ БЕТОНА, ПОДВЕРЖЕННОГО ЩЕЛОЧНОЙ КОРРОЗИИ. МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА*

HUMIDITY DEFORMATION OF CONCRETE SUBJECTED TO ALKALINE CORROSION. THE PROCESS MODEL

Представлен анализ работ по щелочной коррозии цементных бетонов. Показано, что особый интерес представляют работы, в которых анализируется влияние трещин бетона, появившихся в период эксплуатации, на интенсивность такой коррозии. Разработана модель изменения объемных деформаций образцов бетона, в основу которой положено явление техногенного метасоматоза, заключающегося в протекании химических и физико-химических процессов, приводящих к преобразованию параметров структуры и состава материала под действием внешней среды. Проведен анализ модели и сформулированы следствия, фиксация которых при экспериментальных исследованиях позволит идентифицировать протекание техногенного метасоматоза в бетоне.

Ключевые слова: бетон, щелочная коррозия, техногенный метасоматоз, набухание, растворение, модель влажностного деформирования, массопоглощение.

The article presents an analysis of works on alkaline corrosion of cement concrete. It is shown that of particular interest are works that analyze the effect of concrete cracks, which appeared during operation, on the intensity of such corrosion. A model of changes in volume deformations of concrete samples has been developed, which is based on the phenomenon of technogenic metasomatoses involving chemical and physical-chemical processes leading to the transformation of the parameters of the structure and composition of the material under the influence of the external environment. An analysis of the model is carried out and the consequences are formulated, the fixation of which in experimental studies will make it possible to identify the course of technogenic metasomatoses in concrete.

Keywords: concrete, alkaline corrosion, technogenic metasomatoses, dilatation, dissolution, humidity deformation model, mass absorption.

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (проект 'Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз # FSWG-2020-0007).

Введение. Щелочная коррозия бетона является объектом активных исследований уже более 90 лет. Негативные последствия ее протекания общеизвестны и ведут к значительным экономическим потерям. Естественно, щелочная коррозия является объектом интенсивного исследования. Основные направления проводимых исследований и разработок включают:

- установление фундаментальных основ и условий протекания щелоче-кремнеземистой реакции¹;
- определение условий для возникновения внутренних напряжений;
- разработку способов предотвращения и ингибирования щелоче-кремнеземистой реакции.

Кроме того, сформированы предпосылки для определения условий самоорганизации процессов, протекающих при щелоче-кремнеземистой реакции, совместное действие которых приводит к разрушению бетона и конструкций. Библиография в данной области исследования весьма обширна, представим только работы, опубликованные в последние годы [1–19]. Из указанного перечня особый интерес представляют работы, в которых обращается внимание на влияние трещин на процесс щелочной коррозии [8], а также на свойства бетона, в котором протекает щелочная коррозия [10]. В работе [8] отмечается, что трещины, неизбежно образующиеся в процессе нормальной эксплуатации бетона (особенно дорожного) в конструкции, способствуют интенсификации процесса щелочной коррозии вследствие более свободного проникновения (барьерные свойства бетона снижаются) ключевых химических компонентов (воды, солей щелочных металлов в случае применения антигололедных составов) для протекания щелоче-кремнеземистой реакции, а также более свободной миграции продукта реакции — щелоче-силикатного геля — и ионов кальция, повышающих его вязкость.

В работе [10] представлены результаты испытания изготовленного на реакционно-активных заполнителях бетона на ползучесть, статический модуль упругости и предел прочности при сжатии. Установлено, что у бетона, подверженного щелоче-кремнеземистой реакции, наблюдается

повышение предела прочности при сжатии (для рассмотренных бетонов может составлять до 55 % после 560 суток выдержки в камере Вильсона). Изменение статического модуля упругости имеет сложный характер. Протекание щелоче-кремнеземистой реакции приводит к снижению статического модуля упругости, а после расхода солей щелочных металлов (в данной работе использовался K_2SO_4 , который вводили с водой затворения) наблюдается рост модуля упругости. Начало роста модуля упругости также совпадает с выходом на плато кривых ползучести. Таким образом, авторы указанной работы установили, что взаимосвязанными параметрами являются статический модуль упругости и деформации ползучести. Также, по мнению авторов, из данных по изменению предела прочности при сжатии можно сделать неверные заключения о влиянии щелоче-кремнеземистой реакции на эксплуатационные свойства бетона, подверженного щелочной коррозии.

В этой связи представляет определенный научный интерес оценка влияния процессов, протекающих в бетоне при его взаимодействии с окружающей средой, на интенсивность щелочной коррозии.

В научной литературе адаптация строительного материала, связанная с преобразованием параметров его структуры и состава, получила наименование «техногенный метасоматоз» [20]. Такой процесс является термодинамическим процессом, в котором при контакте с жидкостью (раствором) могут протекать явления набухания и растворения. Безусловно, перечень возможных процессов не исчерпывается указанными, но является достаточным для описания техногенного метасоматоза. Так, для описания изменения параметров структуры достаточно использовать явление набухания, которое также можно применить для оценки влияния внутренних напряжений, а для описания изменения состава материала — явление растворения.

Очевидно, что техногенный метасоматоз является также классическим кинетическим процессом, для описания которого разработано несколько моделей. В строительном материаловедении представляет интерес модель «набухание – растворение», разработанная А. Н. Бобрышевым и Н. Н. Тумановой [21–23]. Указанными

¹ В отечественной литературе также применяется термин «щелоче-силикатные реакции».

авторами предложена аддитивная модель, каждое из слагаемых которой описывает процесс набухания или растворения:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \varepsilon_m (1 - A_1^t) + \varepsilon_m (1 - A_2^t e^{2\pi i t}),$$

где ε_m — предельная деформация; ε_1 — деформация набухания; ε_2 — деформация растворения; i — мнимая единица; t — время; A_1 — константа, равная:

$A_1 = (1 - r_1) < 1$; r_1 — линейный параметр роста набухания;

A_2 — константа, равная:

$A_2 = |1 - r_2| > 1$; r_2 — линейный параметр роста растворения.

Управление указанными процессами осуществляется значениями линейных параметров роста r_1 и r_2 , которые в зависимости от значения с различной скоростью приближают ε к значению ε_m . Применение такой модели позволяет с достаточной точностью описать изменение состояния материала, в котором протекают процессы набухания и растворения. Однако не позволяет произвести оценку изменения свойств материала при многократно повторяющихся воздействиях «увлажнение – высыхание», что является частым событием при эксплуатации различных объектов транспортной инфраструктуры, например, бетонных дорог, взлетно-посадочных полос и т. д.

Построение модели и анализ. Цементный камень, являясь гидрофильным материалом, при экспозиции в воде испытывает объемное расширение. Как правило, величина набухания цементного камня меньше величины его усадки в процессе последующего высыхания [24, 25]. Это связано с протеканием нескольких процессов, ключевое влияние которых заключается в уменьшении количества контактов, активных по отношению к воде (величины открытой пористости и химического состава продуктов гидратации), а также зависит от глубины проникновения воды в объем цементного камня.

Деформации влажностного набухания закономерно связаны с процессом водопоглощения, который классически описывается экспоненциальной зависимостью. Как правило, при отсутствии обменных процессов (растворения и удаления из объема материала компонентов) или физико-химического и/или химического свя-

зывания воды процесс водопоглощения можно описать дифференциальным уравнением

$$\frac{dW}{dt} = b(W_{\max} - W). \quad (1)$$

В представленном дифференциальном уравнении $W_{\max}$ соответствует максимальному водопоглощению, характеризуя таким образом наличие предельного объема порового пространства материала, доступного для заполнения жидкостью. Коэффициент b характеризует скорость увеличения водопоглощения и численно обратно пропорционален времени t' , по истечении которого относительная величина водопоглощения $W_{\max}/(W_{\max} - W(t))$ увеличится в e раз:

$$b = 1/t'. \quad (2)$$

Решение дифференциального уравнения (1) имеет вид

$$W(t) = W_{\max} (1 - e^{-bt}). \quad (3)$$

Типичные зависимости водопоглощения по массе представлены на рис. 1, а.

Закономерно предположить, что объемные деформации набухания $\varepsilon_{w,v}$ связаны с водопоглощением следующей зависимостью:

$$\varepsilon_{w,v} = k^{-n} W_m(t), \quad (4)$$

где k, n — коэффициенты, характеризующие способность материала к влажностному набуханию (как правило, k и $n > 1$).

Причем коэффициент k характеризует среднюю величину набухания материала, а коэффициент n — интенсивность набухания.

Линейные деформации $\varepsilon_{w,l}$ могут быть вычислены по объемным деформациям:

$$\varepsilon_{w,v} = \varepsilon_{w,l}^3 + 3\varepsilon_{w,l}^2 + 3\varepsilon_{w,l}. \quad (5)$$

С учетом точности достаточно:

$$\varepsilon_{w,l} = \frac{1}{3} \varepsilon_{w,v}. \quad (6)$$

Отсюда с учетом формул (3), (4) и (6) линейные деформации образца материала равны

$$\varepsilon_{w,l} = \frac{1}{3} \frac{W_{\max}}{k^n} (1 - e^{-bt}). \quad (7)$$

Формулы (7) при назначении всех коэффициентов достаточно для проведения моделирования влажностных деформаций материала.

При протекании каких-либо процессов, приводящих к изменению набухания, может наблюдаться периодический характер (например, при циклах «увлажнение – высыхание»). На рис. 1, б

зависимость периодического изменения коэффициента $k = f(t)$ представлена функцией вида

$$k(t) = A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + k_0, \quad (8)$$

где A_0 , ω_0 , φ_0 и k_0 — константы, подбор которых можно осуществить по соответствующим экспериментальным данным.

Однако использование такого подхода сопряжено с математическими ограничениями. Так, при использовании формул (8) и (4) показатель степени n может принимать только целые значения, то есть $n = 1, 2, 3, \dots, Z$. При этом влияние значения n кардинально меняет результат от протекающих процессов (рис. 1, б). Также имеются и физические трудности, которые связаны с проблематичностью учета вариативности атмосферных явлений. Кроме того, такой подход не позволяет разобраться в причинах, приводящих к эволюционному развитию трещин в бетоне.

Для построения модели, лишенной указанных недостатков, необходимо учесть два важных явления, которые протекают в бетоне при техногенном метасоматозе. Первое явление связано с представлением строительного материала как открытой термодинамической системы, находящейся в состоянии, значительно отличающемся от равновесного. В этом случае будут протекать процессы, которые направлены на установление локального равновесия. Установление глобального равновесия затруднительно вследствие наличия «малоподвижных фаз» по А. И. Русанову [26, 27]. Установление равновесия может сопровождаться протеканием разнообразных обменных процессов, которые идентифицируются как растворение какого-либо соединения и/или образование новых соединений. Совокупность указанных процессов получила название «техногенный метасоматоз» [20]. В рамках рассматриваемой модели будем предполагать, что доминирующими процессами в техногенном метасоматозе являются химические и/или физико-химические процессы, приводящие к удалению (вымыванию) из тела бетона каких-либо соединений.

В этом случае произведем оценку влияния техногенного метасоматоза на величину массового поглощения. Для этого представим массовое поглощение жидкости в классическом виде:

$$W'_m = \frac{m' - m_0}{m_0}, \quad (9)$$

где m' — масса материала, в котором протекают процессы техногенного метасоматоза; m_0 — начальная масса.

Для удобства проведем оценку относительно изменения массового поглощения жидкости, а именно

$$\frac{W'_m}{W_m} = \frac{m' - m_0}{m_0} \cdot \frac{m_0}{m - m_0} = \frac{m' - m_0}{m - m_0}, \quad (10)$$

где m — масса образца без протекания техногенного метасоматоза.

Контакт материала, имеющего открытую пористость, с жидкостью приводит к ее поглощению. В этом случае массу материала можно записать в виде

$$m = m_0 + m_W, \quad (11)$$

где m_W — масса поглощенной жидкости.

При протекании техногенного метасоматоза часть вещества Δm материала удаляется из него, а освободившийся объем занимает жидкость. В этом случае масса материала, в котором протекает техногенный метасоматоз, равна

$$m' = m_0 - \Delta m + m'_W, \quad (12)$$

где m'_W — масса поглощенной жидкости с учетом процессов техногенного метасоматоза.

После подстановки формул (11) и (12) в (10) получим

$$\frac{W'_m}{W_m} = \frac{-\Delta m + m'_W}{m_W}. \quad (13)$$

Массы Δm , m_W и m'_W представим, предполагая наличие очевидных взаимосвязей между объемом открытых пор, заполненных жидкостью, объемом и плотностью материала:

$$\Delta m = \Delta V \rho_r;$$

$$m_W = V_p \rho_W;$$

$$m'_W = m_W + \Delta V \rho_W = V_p \rho_W + \Delta V \rho_W, \quad (14)$$

где ΔV — объем материала, участвующего в техногенном метасоматозе; V_p — объем открытого порового пространства материала; ρ_r — плотность вещества материала, участвующего в техногенном метасоматозе; ρ_W — плотность жидкости.

После подстановки формулы (14) в (13) окончательно получим

$$\frac{W'_m}{W_m} = 1 - \frac{\Delta V}{V_p} \left(\frac{\rho_r - \rho_W}{\rho_W} \right). \quad (15)$$

Анализ последней формулы показывает, что существуют два характерных состояния:

$$1) \frac{W'_m}{W_m} = 1; 2) \frac{W'_m}{W_m} \neq 1. \quad (16)$$

Рис. 1. Типичные зависимости (а) массопоглощения жидкости, смоделированные функцией (3) (при $W_{\max} = 20\%$), и (б) объемного набухания, смоделированные с применением формул (4) и (8)

Значение $W'_m/W_m = 1$ указывает на отсутствие техногенного метасоматоза, а при его протекании ($W'_m/W_m \neq 1$) возможна смена режима с влажностного набухания при ($W'_m/W_m > 0$) на влажностную усадку ($W'_m/W_m < 0$). В рассматриваемой модели под влажностной усадкой понимается процесс уменьшения геометрических размеров образца материала, находящегося во влагонасыщенном состоянии. Указанная смена режима будет происходить при превышении $\Delta V/V_p$ критического значения, равного

$$x_c = \frac{\Delta V}{V_p} = \frac{\rho_W}{\rho_r - \rho_W}. \quad (17)$$

При $x > x_c$ массопоглощение при протекании техногенного метасоматоза W'_m , то есть при заполнении дополнительного по сравнению с объемом порового пространства объема материала, образовавшегося при метасоматозе, меньше массопоглощения W_m , которое характеризует заполнение жидкостью только доступного порового пространства.

Это противоречие может быть устранено только при реализации второго явления, а именно периодического изменения внутренних напряжений в материале. Правомочно предположить, что источником внутренних напряжений при увлажнении будет влажностное набухание. Протекающие процессы техногенного метасоматоза должны способствовать возникновению двух явлений, которые возможно наблюдать экспериментально: вынос вещества; изменение амплитуды влажностных колебаний «набухание – усадка».

Причем указанные явления по интенсивности должны возрастать с увеличением величины внутренних напряжений (наблюдения для ука-

занных явлений могут служить соответствующими индикаторами при проведении исследований).

Снижение внутренних напряжений при протекании техногенного метасоматоза, сопровождающегося выносом вещества материала, должно приводить к «схлопыванию» порового пространства. Указанное в области критического значения x можно записать следующим образом:

$$V_p = k_\sigma V_{p,c}, \quad (18)$$

где k_σ — коэффициент, характеризующий влияние внутренних напряжений: при их наличии k_σ принимает значения $k_\sigma < 1$.

Отсюда значение x вблизи критического значения из формулы (17) будет равно

$$x = \frac{1}{k_\sigma} x_c = \frac{1}{k_\sigma} \left(\frac{\rho_W}{\rho_r - \rho_W} \right). \quad (19)$$

После подстановки формулы (18) в формулу (14) получим

$$\frac{W'_m}{W_m} = \frac{k_\sigma - 1}{k_\sigma}. \quad (20)$$

Используя формулу (20), линейные деформации образца материала (формула (7)) можно преобразовать к виду

$$\varepsilon_{W,l} = \frac{1}{3} k_0 \left(\frac{k_\sigma - 1}{k_\sigma} \right) W_{\max} (1 - e^{-bt}), \quad (21)$$

где k_0 — нормировочный коэффициент для перевода массопоглощения к деформациям.

Основным отличием формулы (21) от формулы (7) является замена функции $1/k^n$ на функцию, представленную в формуле (20).

Изменение соотношения W'_m/W_m , рассчитанное по формуле (20), демонстрирует, что в об-

Рис. 2. Зависимость $W'_m/W_m = f(k_\sigma)$ (а) и скорость изменения $W'_m/W_m = f(k_\sigma)$ (б) (скорость изменения $W'_m/W_m = f(k_\sigma)$ равна $d(W'_m/W_m)/dk_\sigma = 1/k_\sigma^2$)

ласти $k_\sigma < 1$ указанное соотношение изменяется более интенсивно (рис. 2).

Повышение внутренних напряжений в материале при набухании может быть охарактеризовано изменением величины коэффициента k_σ . При отсутствии техногенного метасоматоза сушка материала приведет к возвращению его образца к исходным размерам. Такой цикл изменения влажностных деформаций «набухание – сушка» можно назвать «нормальным» при выполнении следующих условий:

- набухание: $k_\sigma = 1 + \Delta k_\sigma > 1$ и $W'_m/W_m > 0$ (здесь Δk_σ — приращение коэффициента k_σ);
- сушка: $k_\sigma \rightarrow 1$ и $W'_m/W_m \rightarrow 0$.

При протекании техногенного метасоматоза возможно возникновение ситуации, при которой значение коэффициента k_σ может изменяться в диапазоне от $1 - \Delta k_\sigma$ до $1 + \Delta k_\sigma$. Проведем анализ изменения массопоглощения при $k_\sigma^{(-)} = 1 - \Delta k_\sigma$ и $k_\sigma^{(+)} = 1 + \Delta k_\sigma$. Значения массопоглощения при $k_\sigma^{(-)}$ и при $k_\sigma^{(+)}$ соответственно равны

$$\begin{aligned} \frac{W_m^{(-)}}{W_m} &= -\frac{\Delta k_\sigma}{1 - \Delta k_\sigma}; \\ \frac{W_m^{(+)}}{W_m} &= \frac{\Delta k_\sigma}{1 + \Delta k_\sigma}. \end{aligned} \quad (22)$$

Отсюда соотношение $|W_m^{(-)}/W_m^{(+)}|$ равно

$$\left| \frac{W_m^{(-)}}{W_m^{(+)}} \right| = \frac{1 + \Delta k_\sigma}{1 - \Delta k_\sigma}. \quad (23)$$

Из формулы (23) следует, что при любом значении $\Delta k_\sigma > 0$ значение всегда $|W_m^{(-)}/W_m^{(+)}| > 1$. Это указывает на то, что деформации влажностной усадки больше (рис. 3, а).

Очевидно, что уменьшение соотношения $|W_m^{(-)}/W_m^{(+)}|$ закономерно приводит к уменьшению коэффициента $k_\sigma^{(-)} < (1 - \Delta k_\sigma)$. Для обеспечения равенства $A^{(+)} = A^{(-)}$ (рис. 3, б) величина $\Delta k_\sigma^{(-)}$ должна быть уменьшена в χ раз:

$$\chi = \frac{1}{1 + 2\Delta k_\sigma}. \quad (24)$$

Отсюда по соотношению $A^{(+)}A^{(-)}$, определенному экспериментально (например, по данным, аналогичным рис. 3), можно произвести качественную оценку напряженного состояния материала при протекании техногенного метасоматоза. Для этого, используя формулы (4) и (6), запишем

$$\begin{aligned} A^{(+)} &= \varepsilon_{W,l}^{(+)} = \frac{1}{3} \frac{W_m^{(+)}}{k^n}; \\ A^{(-)} &= \varepsilon_{W,l}^{(-)} = \frac{1}{3} \frac{W_m^{(-)}}{k^n}. \end{aligned} \quad (25)$$

Из формул (25) соотношение $A^{(+)}A^{(-)}$ равно

$$\frac{A^{(+)}}{A^{(-)}} = \left(\frac{\varepsilon_{W,l}^{(+)}}{\varepsilon_{W,l}^{(-)}} \right) = \left(\frac{W_m^{(+)}}{W_m^{(-)}} \right) = \frac{1}{\alpha_0}, \quad (26)$$

где α_0 — экспериментально установленное соотношение $A^{(+)}A^{(-)}$.

Очевидно, что опасность представляют внутренние напряжения, которые возникают при влажностной усадке (растягивающие напряжения). Они характеризуются коэффициентом $k_\sigma^{(-)}$, который с учетом формул (21), (25) и (26) равен

$$k_\sigma^{(-)} = \frac{k_0 W_{\max} (1 - e^{-bt})}{k_0 W_{\max} (1 - e^{-bt}) + 3\alpha_0 \varepsilon_{W,l}^{(+)}} = \frac{1}{1 + \alpha_0}. \quad (27)$$

Преобразование формулы (27) проведено на основе формального соответствия

Рис. 3. Зависимости $W'_m/W_m = f(k_\sigma)$: при $k_\sigma^{(-)}/k_\sigma^{(+)} = 1$ (а) и при $k_\sigma^{(-)}/k_\sigma^{(+)} < 1$ (б)
(здесь $A^{(i)}$ — амплитуда колебания цикла «влажностное набухание – влажностная усадка»)

$k_0 W_{\max} (1 - e^{-bt}) = 3\varepsilon_{W,I}^{(+)}$, которое следует из формул (4) и (6). Из указанной формулы следует, что при $\alpha \rightarrow 0$ значение коэффициента $k_\sigma^{(-)} \rightarrow 1$. Это соответствует нормальному режиму работы материала при переменном «увлажнении – высушивании» и указывает на отсутствие техногенного метасоматоза.

Таким образом, разработанная модель влияния техногенного метасоматоза, проявляющегося в способности вещества материала набухать под влиянием жидкости, а также частично в ней растворяться, позволяет предсказать:

1) появление процесса «влажностное набухание – влажностная усадка», который должен активизировать процесс физической деструкции материала;

2) внешним проявлением протекания процесса техногенного метасоматоза является «вынос» растворенного вещества за пределы материала. В стационарных условиях этот процесс может сопровождаться соответствующими отложениями на гранях образца материала (при достижении предельной концентрации растворенного вещества);

3) проявлением техногенного метасоматоза, которое может быть инструментально зафиксировано, является увеличение амплитуды колебания процесса «влажностное набухание – влажностная усадка» с повышением величины внутренних напряжений. Повышение величины внутренних напряжений также должно сопровождаться повышением интенсивности «выноса»

вещества из материала. В этой связи должна наблюдаться хорошая корреляция между указанными характеристиками.

Библиографический список

1. Брыков А. С., Воронков М. Е. Щелоче-кремнеземные реакции, щелочная коррозия портландцементных бетонов и пуццолановые добавки-ингибиторы коррозии // Цемент и его применение. 2014. № 5. С. 87–94.
2. Шкаркова Я. Бетонные дороги в Чешской Республике // Цемент и его применение. 2015. № 5. С. 102–107.
3. Королев Е. В., Альбакасов А. И., Иноземцев А. С. Основные свойства пропиточно-кольматирующих составов для ингибирования щелочесиликатных реакций // Строительные материалы. 2015. № 7. С. 24–29.
4. Брыков А. С., Анисимова А. В., Розенкова Н. С., Мокеев М. В. Сравнительное исследование сульфатов железа (III) и алюминия в качестве ингибиторов щелоче-кремнеземных реакций // Цемент и его применение. 2015. № 5. С. 50–55.
5. Рояк Г. С., Грановская И. В., Стржалковская Н. В., Миленин Д. А. Портландцемент, содержащий золу-унос для предотвращения щелочной коррозии бетона // Цемент и его применение. 2015. № 1. С. 89–92.
6. Курдовски В. Значение щелочей в цементе для технологии бетона // Цемент и его применение. 2015. № 1. С. 40–44.
7. Попов М. Ю., Ким Б. Г., Ваганов В. Е., Брыков А. С. Щелоче-силикатная коррозия в легких бетонах на цементном вяжущем с пористым заполнителем на основе гранулированного пеностекла // Цемент и его применение. 2015. № 4. С. 89–93.

8. Брайтенбюхер Р., Пиондзионо Р. Взаимодействие щелочей с кремнеземом в бетонных дорожных покрытиях // Цемент и его применение. 2015. № 4. С. 95–101.
9. Хироно С., Ямада К., Андо Й., Тории К. Проблемы, связанные с щелоче-кремнеземной реакцией, в Японии и Таиланде // Цемент и его применение. 2016. № 3. С. 88–94.
10. Озкан Х., Райнхард Х. В., Милих О. Первые результаты испытаний ползучести бетона, поврежденного в результате щелоче-кремнеземной реакции // Цемент и его применение. 2016. № 6. С. 98–100.
11. Льюис Р. С., Байрак Э. Применение микрокремнезема для профилактики щелоче-кремнеземной реакции с целью обеспечить использование местных заполнителей в Турции // Цемент и его применение. 2016. № 4. С. 108–111.
12. Сафаров К. Б., Степанова В. Ф., Фаликман В. Р. Влияние механоактивированной низкокальциевой золы-уноса на коррозионную стойкость гидротехнических бетонов Рогунской ГЭС // Строительные материалы. 2017. № 10. С. 20–24.
13. Остерхус Л., Домбровски К., Шмидт-Дель Ф. Исследование растворимости заполнителей для быстрой оценки их реакционной способности // Цемент и его применение. 2017. № 2. С. 89–94.
14. Стрык Й., Грегорова М., Фрыборт А., Стурилова Й. Анализ микроструктуры кернов дорожного бетона // Цемент и его применение. 2018. № 6. С. 82–85.
15. Ромененко И. И. Стойкость заполнителей в цементном камне в обеспечении долговечности сооружений // Региональная архитектура и строительство. 2019. № 2. С. 32–38.
16. Брыков А. С., Воронков М. Е., Парицкая Н. С. Превращения в цементных композициях с бесщелочными ускорителями в ходе ускоренных испытаний на устойчивость к воздействию щелочей // Цемент и его применение. 2019. № 3. С. 93–97.
17. Розенталь Н. К. Коррозия бетона при взаимодействии щелочей с диоксидом кремния заполнителя // Бетон и железобетон. 2012. № 1. С. 50–60.
18. Рояк Г. С. Разрушительные реакции щелочей с кремнеземом заполнителей в бетоне: предотвращение и тенденции // Alitinform. 2015. №6 (41). С. 54–60.
19. Розенталь Н. К., Любарская Г. В., Розенталь А. Н. Реакционная способность заполнителей и коррозионная стойкость бетона // Бетон и железобетон — взгляд в будущее: Научные труды III Всерос. (II Международной) конф. по бетону и железобетону: в 7 т. Т. III. 2014. С. 377–387.
20. Лесовик В. С., Фомина Е. В., Айзеништадт А. М. Некоторые аспекты техногенного метасоматоза в строительном материаловедении // Строительные материалы. 2019. № 1–2. С. 100–106.
21. Авдеев Р. И., Бобрышев А. Н., Туманова Н. Н. и др. Модели эволюционных процессов с линейным отображением // Известия Тульского государственного университета. Серия: «Технология, механика и долговечность строительных материалов, конструкций и сооружений». 2001. Вып. 2. С. 45–49.
22. Бобрышев А. Н., Козомазов В. Н., Авдеев Р. И., Туманова Н. Н. Топологические особенности кинетических процессов // Конденсированные среды и межфазные границы. 2003. Т. 5, № 2. С. 120–125.
23. Бобрышев А. Н., Ерофеев В. Т., Козомазов В. Н. Физика и синергетика дисперсно-неупорядоченных конденсированных композиционных систем. СПб.: Наука, 2012. 476 с.
24. Невиль А. М. Свойства бетона. М.: Стройиздат., 1972. 344 с.
25. Славчева Г. С., Чемоданова С. Н. Влияние параметров структуры на влажностные деформации высокопрочного модифицированного бетона // Строительные материалы. 2011. № 8. С. 32–34.
26. Русанов А. И. Развитие фундаментальных положений термодинамики поверхностей // Коллоидный журнал. 2012. Т. 74, № 2. С. 148–166.
27. Русанов А. И. Лекции по термодинамике поверхностей. СПб.: Лань, 2013. 240 с.

References

1. Brykov A. S., Voronkov M. E. *Shchelochekremnezemnye reaktsii, shchelochnaya korroziiya portlandtsementnykh betonov i putstsolanovye dobavki inhibitory korrozii* [Alkali-silica reactions, alkaline corrosion of Portland cement concretes and pozzolanic additives-corrosion inhibitors]. *Tsement i ego primenenie – Cement and its Applications*, 2014, no. 5, pp. 87–94.
2. Shkarkova Ya. *Betonnye dorogi v Cheshkoy Respublike* [Concrete roads in the Czech Republic]. *Tsement i ego primenenie – Cement and its Applications*, 2015, no. 5, pp. 102–107.
3. Korolev E. V., Al'bakasov A. I., Inozemtsev A. S. *Osnovnye svoystva propitochno-kol'matiruyushchikh sostavov dlya ingibirovaniya shchelochesilikatnykh reaktsiy* [Basic properties of impregnating-colmatating compounds for inhibiting alkali-silicate reactions]. *Stroitel'nye materialy – Construction materials*, 2015, no. 7, pp. 24–29.
4. Brykov A. S., Anisimova A. V., Rozenkova N. S., Mokeev M. V. *Sravnitel'noe issledovanie sul'fatov zheleza (III) i alyuminiya v kachestve ingibitorov shchelochekremnezemnykh reaktsiy* [Comparative study of iron (III) and aluminum sulfates as inhibitors of alkali-silica reactions]. *Tsement i ego primenenie – Cement and its Applications*, 2015, no. 5, pp. 50–55.

5. Royak G. S., Granovskaya I. V., Strzhalkovskaya N. V., Milenin D. A. *Portlandsement, soderzhashchiy zolu-unos dlya predotvrashcheniya shchelochnoy korrozii betona* [Portland Cement containing fly ash to prevent alkaline corrosion of concrete]. *Tsement i ego primeneniye – Cement and its Applications*, 2015, no. 1, pp. 89–92.
6. Kurdovski V. *Znachenie shchelochey v tsemente dlya tekhnologii betona* [Value of alkalis in the cement for concrete technology]. *Tsement i ego primeneniye – Cement and its Applications*, 2015, no. 1, pp. 40–44.
7. Popov M. Yu., Kim B. G., Vaganov V. E., Brykov A. S. *Shchelochke-silikatnaya korroziya v legkikh betonakh na tsementnom vyazhushchem s poristym zapolnitelem na osnove granulirovannogo penostekla* [Alkali-silicate corrosion in light concrete on a cement binder with a porous filler based on granulated foam glass]. *Tsement i ego primeneniye – Cement and its Applications*, 2015, no. 4, pp. 89–93.
8. Braytenbyukher R., Pshondziono R. *Vzaimodeystvie shchelochey s kremnezemom v betonnykh dorozhnykh pokrytiyakh* [Interaction of alkalis with silica in concrete road surfaces]. *Tsement i ego primeneniye – Cement and its Applications*, 2015, no. 4, pp. 95–101.
9. Khirono S., Yamada K., Ando Y., Torii K. *Problemy, svyazannye s shchelochke-kremnezemnoy reaktsiyey, v Yaponii i Tailande* [Problems related to the alkali-silica reaction in Japan and Thailand]. *Tsement i ego primeneniye – Cement and its Applications*, 2016, no. 3, pp. 88–94.
10. Ozkan Kh., Raynkhhard Kh. V., Milikh O. *Pervye rezul'taty ispytaniy polzuchesti betona, povrezhdenного v rezul'tate shchelochke-kremnezemnoy reaktsii* [First results of creep tests of concrete damaged as a result of alkali-silica reaction]. *Tsement i ego primeneniye – Cement and its Applications*, 2016, no. 6, pp. 98–100.
11. Lyuis R. S., Bayrak E. *Primeneniye mikro-kremnezema dlya profilaktiki shchelochke-kremnezemnoy reaktsii s tsel'yu obespechit' ispol'zovanie mestnykh zapolniteley v Turtsii* [Application of micro-silicon for prevention of alkali-silica reaction in order to ensure the use of local aggregates in Turkey]. *Tsement i ego primeneniye – Cement and its Applications*, 2016, no. 4, pp. 108–111.
12. Safarov K. B., Stepanova V. F., Falikman V. R. *Vliyanie mekhanoaktivirovannoy nizkoka'lsievoy zoly-unosa na korroziionnuyu stoykost' gidrotekhnicheskikh betonov Rogunskoy GES* [Influence of mechanically activated low-calcium fly ash on the corrosion resistance of Rogun hydro-power station]. *Stroitel'nye materialy – Construction materials*, 2017, no. 10, pp. 20–24.
13. Osterkhus L., Dombrovski K., Shmidt-Dyol' F. *Issledovanie rastvorimosti zapolniteley dlya bystroy otsenki ikh reaktsionnoy sposobnosti* [Investigation of the solubility of aggregates for rapid assessment of their reactivity]. *Tsement i ego primeneniye – Cement and its Applications*, 2017, no. 2, pp. 89–94.
14. Stryk Y., Gregerova M., Frybort A., Sturilova Y. *Analiz mikrostruktury kernov dorozhnogo betona* [Analysis of the microstructure of road concrete cores]. *Tsement i ego primeneniye – Cement and its Applications*, 2018, no. 6, pp. 82–85.
15. Romenenko I. I. *Stoykost' zapolniteley v tsementnom kamne v obespechenii dolgovechnosti sooruzheniy* [Resistance of aggregates in cement stone in ensuring the durability of structures]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo – Regional architecture and construction*, 2019, no. 2, pp. 32–38.
16. Brykov A. S., Voronkov M. E., Paritskaya N. S. *Prevrashcheniya v tsementnykh kompozitsiyakh s besshchelochnymi uskoritelyami v khode uskorenykh ispytaniy na ustoychivost' k vozdeystviyu shchelochey* [Transformations in cement compositions with alkali-free accelerators during accelerated tests for resistance to alkali]. *Tsement i ego primeneniye – Cement and its Applications*, 2019, no. 3, pp. 93–97.
17. Rozental' N. K. *Korroziya betona pri vzaimodeystvii shchelochey s dioksidom kremniya zapolnitelya* [Concrete corrosion in the interaction of alkalis with silicon dioxide filler]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, 2012, no. 1, pp. 50–60.
18. Royak G. S. *Razrushitel'nye reaktsii shchelochey s kremnezemom zapolniteley v betone: predotvrashchenie i tendentsii* [Destructive reactions of alkali with silica fillers in concrete: prevention and trends]. *ALITinform – ALITinform: cement, concrete, dry mixes*, 2015, no. 6 (41), pp. 54–60.
19. Rozental' N. K., Lyubarskaya G. V., Rozental' A. N. *Reaktsionnaya sposobnost' zapolniteley i korroziionnaya stoykost' betona* [Reactivity of aggregates and corrosion resistance of concrete]. *Nauchnye trudy III Vseros. (II Mezhdunarodnoy) konf. po betonu i zhelezobetonu «Beton i zhelezobeton – vzglyad v budushchee»* [Proceedings of the III All-Russia (II International) conf. for study of concrete and reinforced concrete “Concrete and reinforced concrete: a look into the future”]. In 7 vols. 2014, Vol. III, pp. 377–387.
20. Lesovik V. S., Fomina E. V., Ayzenshtadt A. M. *Nekotorye aspekty tekhnogennoy metasomatoza v stroitel'nom materialovedenii* [Some aspects of technological metasomatism in the construction materials]. *Stroitel'nye materialy – Building materials*, 2019, no. 1–2, pp. 100–106.
21. Avdeev R. I., et al. *Modeli evolyutsionnykh protsessov s lineynym otobrazheniem* [Models of evolutionary processes with linear mapping]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: «Tekhnologiya, mekhanika i dolgovechnost' stroitel'nykh materialov, konstruktiv i sooruzheniy»* [Proceedings of the Tula State University. Series: “Technology, mechanics and durability

of building materials, structures and structures”]. 2001, iss. 2, pp. 45–49.

22. Bobryshev A. N., Kozomazov V. N., Avdeev R. I., Tumanova N. N. *Topologicheskie osobennosti kineticheskikh protsessov* [Topological features of kinetic processes]. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy – Condensed media and interfacial boundaries*, 2003, vol. 5, no. 2, pp. 120–125.

23. Bobryshev A. N., Erofeev V. T., Kozomazov V. N. *Fizika i sinergetika despersno-neuporyadochennykh kondensirovannykh kompozitsionnykh sistem* [Physics and synergetics of desperse-disordered condensed composite systems]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2012, 476 p.

24. Nevil’ A. M. *Svoystva betona* [Properties of concrete]. Stroyizdat Publ., Moscow, 1972, 344 p.

25. Slavcheva G. S., Chemodanova S. N. *Vliyanie parametrov struktury na vlazhnostnye deformatsii vysokoprochnogo modifitsirovannogo betona* [The influence of structure parameters on humidity deformations of high-strength modified concrete]. *Stroitel’nye materialy – Construction materials*, 2011, no. 8, pp. 32–34.

26. Rusanov A. I. *Razvitie fundamental’nykh polozheniy termodinamiki poverkhnostey* [Development of fundamental positions of thermodynamics of surfaces]. *Kolloidnyi zhurnal – Colloid Journal*, 2012, vol. 74, no. 2, pp. 148–166.

27. Rusanov A. I. *Lektsii po termodinamike poverkhnostey* [Lectures on thermodynamics of surfaces]. St. Petersburg, Lan’ Publ., 2013, 240 p.