

## Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций с учетом сульфатной коррозии бетона

*Д.т.н., заведующий кафедрой В.П. Селяев;*

*к.ф.-м.н., доцент В.А. Неверов;*

*к.т.н., доцент П.В. Селяев;*

*преподаватель кафедры строительных конструкций Е.В. Сорокин;*

*соискатель кафедры строительных конструкций О.А. Юдина,*

*ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва»*

**Аннотация.** Многочисленные данные по обследованию состояния железобетонных конструкций свидетельствуют о том, что под действием различных факторов (температуры, влажности, газовой среды) несущая способность и жесткость в процессе эксплуатации снижаются. В статье рассмотрены проблемы оценки остаточного ресурса и долговечности железобетонных конструкций.

Проведены экспериментальные исследования взаимодействия материала бетонных образцов с агрессивной сульфатосодержащей средой. Путем измерения микротвердости получены изохроны деградаций, дающие возможность экспериментально определить скорость продвижения координат фронта деструкции вглубь изделия; интенсивность изменения прочностных свойств на поверхности материала и другие показатели, характеризующие процесс деградации.

В статье исследованы механизмы протекания коррозионных процессов в железобетоне, находящемся в условиях сульфатной коррозии. Предложены расчетная модель и метод, позволяющие прогнозировать долговечность железобетонных конструкций.

**Ключевые слова:** долговечность; сульфатная коррозия бетона; деструкция цементного камня; деградационные функции

В практике проектирования надежность железобетонных конструкций обеспечивалась расчетами на силовые воздействия и созданием условий для нормальной эксплуатации. Однако результаты обследования железобетонных конструкций свидетельствуют о том, что под действием различных факторов (температуры, влажности, газовой среды) несущая способность и жесткость в процессе эксплуатации снижаются. Поэтому проблема оценки остаточного ресурса, долговечности железобетонных конструкций является актуальной.

Первые методы прогнозирования долговечности позволяли оценивать влияние длительного силового сопротивления (статических, динамических, режимных нагрузок) на ползучесть и длительную прочность железобетонных конструкций. Различные подходы к решению этой задачи изложены в работах А.А. Гвоздева, В.М. Бондаренко, С.В. Бондаренко, Ю.М. Баженова, В.И. Колчунова, Н.И. Карпенко [1–9].

С.В. Александровский [7] предложил расчетные модели, в которых кроме нагрузки учитывалось влияние изменения влажности, температуры на ползучесть железобетонных конструкций.

Новый этап в развитии теории долговечности железобетонных конструкций был сделан после того, как в материаловедении были накоплены экспериментальные данные о влиянии агрессивных сред на бетон и арматуру. В работах С.Н. Алексеева, В.И. Бабушкина, П.Г. Комохова, Ю.М. Баженова, С.В. Шестоперова, В.М. Москвина, Ш.М. Рахимбаева, С.Н. Леоновича [6, 10–22] были описаны различные механизмы взаимодействия цементного камня с агрессивной средой. Предлагалось долговечность железобетонных конструкций определять по изменению концентрации гидроксида кальция или других компонентов, входящих в химический состав цементного камня. Этот весьма полезный для науки подход дал возможность понять, что процесс деградации железобетонных конструкций развивается во времени и возможны различные механизмы взаимодействия бетона и арматуры с агрессивной средой. Было установлено, что в процессе деградации в пределах площади поперечного сечения формируется несколько зон, отличающихся степенью деструкции материала [6, 11, 15, 16, 23–25]. Однако не было известно, как изменяются в процессе взаимодействия бетона с агрессивной средой его прочностные, деформативные свойства по высоте поперечного сечения образца; какова интенсивность их

Селяев В.П., Неверов В.А., Селяев П.В., Сорокин Е.В., Юдина О.А. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций с учетом сульфатной коррозии бетона

изменения во времени; какими функциями можно описать продвижение фронта деградации вглубь изделия; какими методами можно определить предельную концентрацию в бетоне диффундирующего водного раствора. Ответы на эти вопросы были впервые получены в работах В.П. Селяева, В.Н. Уткиной, Л.М. Ошкиной, Л.И. Куприяшкиной и других учеников этой научной школы [18, 26–29]. Наиболее полно результаты исследований по химическому сопротивлению материалов, обоснованию механизмов, моделей деградации, созданию методов расчета долговечности армобетонных конструкций систематизированы и изложены в работах [6, 21, 22, 27, 29].

Целью данной статьи является разработка расчетных моделей и методов, позволяющих прогнозировать долговечность железобетонных конструкций с учетом сульфатной коррозии бетона.

Экспериментальные исследования проводились на образцах-призмах размерами 20x20x70 мм из мелкозернистого цементного бетона. После выдерживания образцов в 2%-м водном растворе серной кислоты по стандартной методике определено изменение размеров, веса, прочности. Склерометрическим методом путем измерения микротвердости пластинок, вырезанных из образцов, получали графики изменения твердости (прочности) по высоте поперечного сечения пластинки, которые предложено называть изохронами деградации [27]. Характерные графики, полученные в процессе экспериментальных исследований, представлены на рисунках 1–6. Полученные данные позволяют провести более глубокий анализ физических и химических процессов, происходящих при взаимодействии водных растворов серной кислоты с цементным мелкозернистым бетоном.

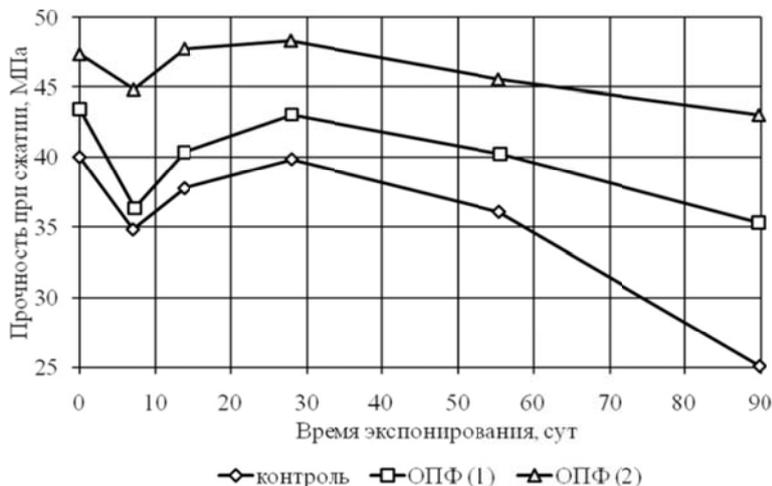


Рисунок 1. Изменение прочности в 2%-м растворе  $H_2SO_4$  (равноподвижные составы с ОПФ)

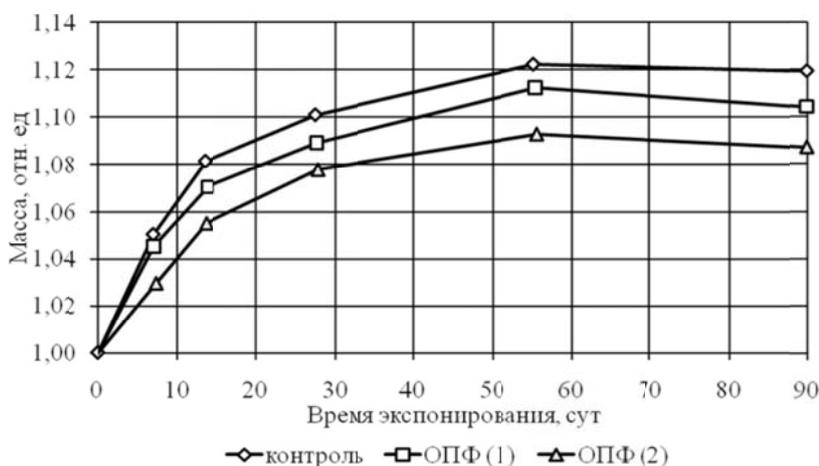


Рисунок 2. Изменение массы в 2%-м растворе  $H_2SO_4$  (равноподвижные составы с ОПФ)

Под действием водных растворов, содержащих сульфат-ионы, реализуется наиболее сложный процесс деструкции цементного камня, в котором можно выделить несколько этапов.

На первом этапе в пределах площади поперечного сечения образца формируется три области деградации: латентной (от «0» до «а»), активной (от «а» до «в»), нулевой (от «в»). На втором этапе исчезают области латентной и нулевой деградации. Изохроны деградации в пределах площади поперечного сечения описываются квадратной параболой или линейным графиком (см. рис. 5).

Изохроны деградации получены склерометрическим методом путем измерения микротвердости на образцах из мелкозернистого цементного бетона, выдержанных в 2%-м водном растворе серной кислоты по методике, изложенной в работе [6]. Образцы представлены на рисунках 3–6. Они дают возможность экспериментально определить скорость продвижения координаты фронта деструкции вглубь изделия; интенсивность изменения прочностных свойств на поверхности и в центре площади поперечного сечения образца; проверить адекватность физических моделей, принятых для определения этих характеристик.

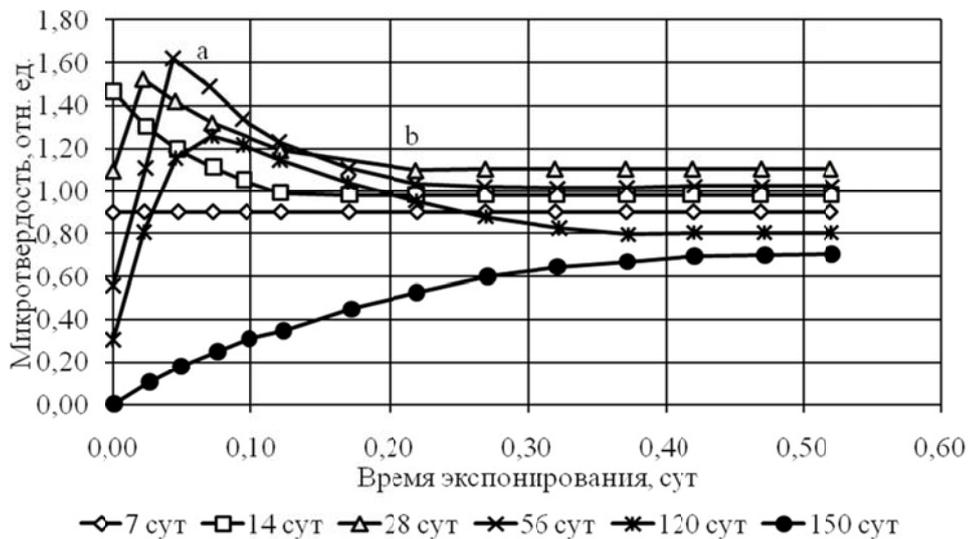


Рисунок 3. Изменение микротвердости в 2%-м растворе  $H_2SO_4$  (наполнение ОПФ – 10%, ТРТ)

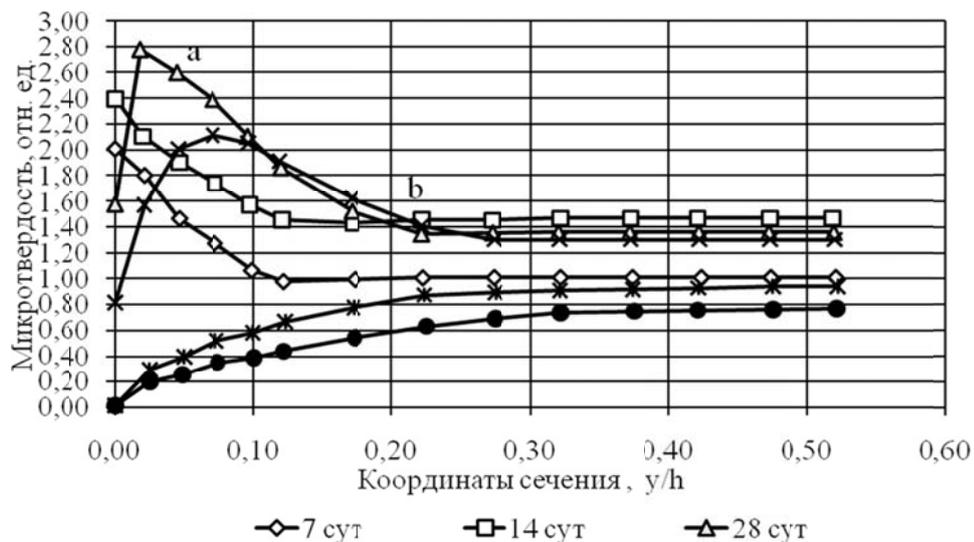


Рисунок 4. Изменение микротвердости в 2%-м растворе  $H_2SO_4$  (наполнение шлак – 20%, ИРТ)

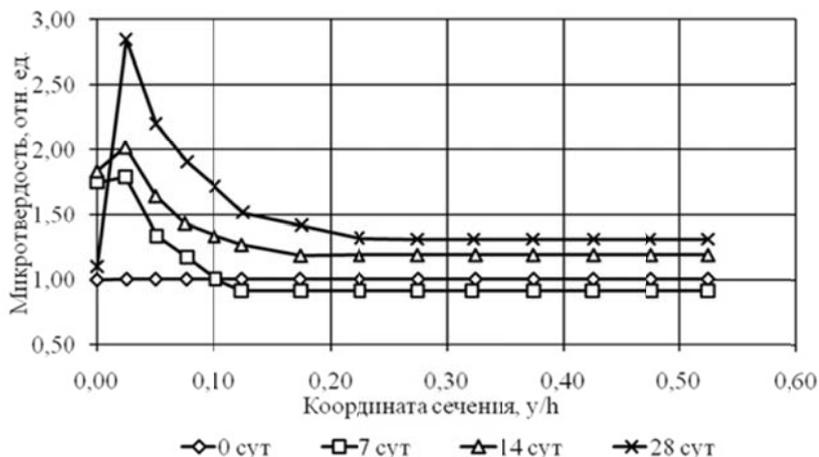


Рисунок 5. Изменение микротвердости в 2%-м растворе  $H_2SO_4$  (наполненный состав без нагрузки)

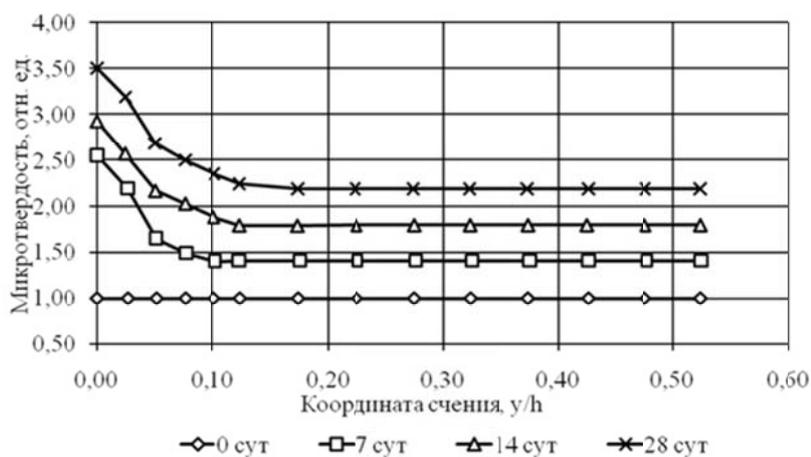


Рисунок 6. Изменение микротвердости в 2%-м растворе  $H_2SO_4$  (наполненный состав,  $0,5P_{разр.}$ )

Анализ изохрон деградации позволяет сформулировать основные принципы создания расчетной модели.

1. Механизм деградации зависит от соотношения интенсивности протекания двух процессов – процесса переноса энергии, которая оказывает разрушающее воздействие, и процесса разрушения структуры, скорость которого зависит от уровня энергетического воздействия в микрообъеме; процесс деградации может протекать одновременно с набором прочности бетона во времени (явление характерное только для цементных композитов).

2. Деструкция материала на поверхности образца протекает интенсивнее, чем в объеме, так как потенциал энергетического воздействия имеет наибольшее значение, и в предельном случае возможна ее стабилизация. При этом прочностные свойства материала на поверхности образца могут снижаться до нулевого уровня.

3. После предельного насыщения материала агрессивной средой деструкция имеет объемный характер. Изохроны деградации описываются квадратной параболой или в первом приближении линейным уравнением.

4. Предельная концентрация  $\omega_0$  агрессивной среды в материале, термодинамически соответствующая максимальному насыщению при  $t \rightarrow \infty$ , может быть определена по кривым сорбции.

5. Скорость продвижения фронта деструкции зависит от уровня сжимающих напряжений.

Аналитические предпосылки расчетной модели базируются на принципах теории обобщенной проводимости, согласно которой поток вещества энергии  $J$ , переносимый в направлении  $X$ , прямо пропорционален градиенту субстанции  $q$ :

$$J = -D_m \text{grad}q, \quad (1)$$

где  $J$  – вектор энергетического потока, вызванный градиентом параметра  $q$ ;  $D_m$  – показатель эффективной проводимости. Под параметром  $q$  может пониматься температура, концентрация агрессивной среды, напряжение электрического или магнитного тока, химическая или биологическая энергия.

Зависимость степени разрушения структуры материала от уровня энергетического воздействия является общей для всех материалов и видов энергии, что неоднократно теоретически и экспериментально подтверждено. Исходя из этого, можно утверждать о наличии объективных предпосылок для создания обобщенной теории деградации материалов. Однако необходимо учитывать, что каждый вид энергии будет вносить свои особенности в процесс деградации материала.

Энергию химического воздействия принято определять формулой в виде произведения  $vq$ , где  $v$  – химический потенциал;  $q$  – концентрация агрессивной среды (характеристика количества химической энергии). Следовательно, уравнение переноса химической энергии можно выразить законом Фика, который при условии, что в уравнении (1)  $D_m$  не зависит от  $q$ , имеет вид:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 q}{\partial x^2}. \quad (2)$$

Решение этого уравнения дает возможность определения координаты фронта области деградации «а» по формуле [27]:

$$a = k(\xi) \sqrt{D_m t}, \quad (3)$$

где  $k(\xi)$  – коэффициент, который зависит от многих факторов, в том числе и от химического потенциала реакционно-активных компонентов среды и материала.

Предельную концентрацию  $\omega_0$  предлагается определить по сорбционным кривым, описывая процесс сорбции дробно-линейной функцией вида:

$$q = \frac{q_0 t}{(t_0 + t)}, \quad (4)$$

где  $q_0$  – предельная сорбционная емкость при  $t \rightarrow \infty$ ; одинаковая при разных температурах и напряжениях по аналогии с набуханием [30];  $t_0$  – характеристика кинетики набухания, зависящая от температуры и нагрузки.

Для проверки пригодности и выявления констант  $q_0$  и  $t_0$  формулу (4) можно представить линейной зависимостью  $\frac{1}{\omega} - \frac{1}{t}$  в следующем виде:

$$\frac{1}{\omega} = \frac{1}{\omega_0} + \left( \frac{t_0}{\omega_0} \right) \left( \frac{1}{t} \right). \quad (5)$$

Определив предельную сорбционную емкость  $q_0$ , можно упростить методику нахождения по сорбционным кривым коэффициента диффузии  $D$ , определяя его численное значение по формуле:

$$D = \left[ \ln \frac{8}{\pi} - \ln \frac{q_0 - q(t)}{q_0} \right] \frac{4R^2}{\pi^2 t}. \quad (6)$$

Можно предположить, что показатель скорости продвижения фронта диффузии агрессивной жидкости является достоверной оценкой показателя скорости продвижения фронта деградации ( $D \approx D_m$ ).

Так как скорость процесса переноса энергии можно описать уравнением (2), в котором  $q$  является показателем количества энергии разрушения, доставленной в заданную точку, скорость процесса разрушения можно описать уравнением:

$$\frac{\partial c_b}{\partial t} = -k c_b^m q_0, \quad (7)$$

где  $c_b$  – концентрация связей в материале;  $q_0$  – предельная концентрация агрессивной среды в микрообъеме;  $m$  – порядок реакции ( $m = 1$ );  $k$  – константа скорости процесса разрушения химических связей в материале.

Решение уравнения (7) при условии, что  $m = 1$ , дает возможность определить изменение концентрации связей во времени функцией вида:

$$\frac{C_b(t)}{C_b(0)} = \frac{A(t)}{A(0)} = \frac{\sigma(t)}{\sigma(0)} = \exp\{-kq_0t\}, \quad (8)$$

Анализом изохрон деградации установлено, что при оценке долговечности железобетонных конструкций эффект латентной деградации можно не учитывать, а изменение во времени относительной прочности внешних слоев бетона  $k_{xc}$  оценивать функцией вида:

$$K_{xc} = \frac{K_a}{t/t_a}, \quad (9)$$

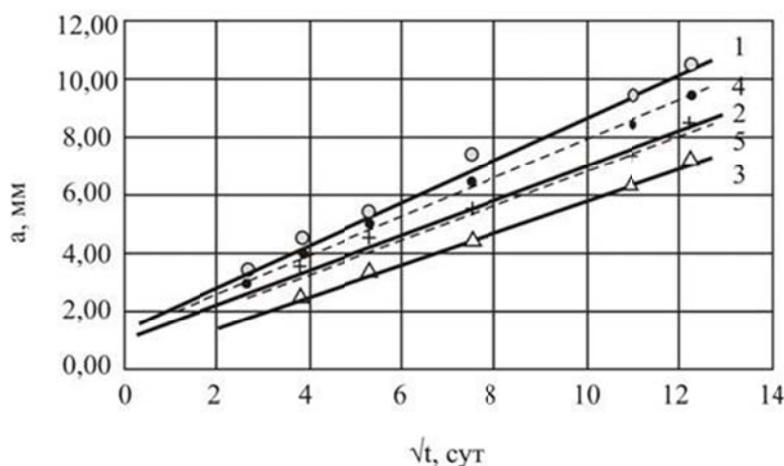
где  $K_a$  и  $t_a$  – коэффициенты уравнения, определяемые по экспериментальным данным.

Если учитывать эффект латентной деградации, то следует применять формулу (9) вида:

$$K_{xc} = K_l \exp\{-K\omega_0t\}, \quad (9')$$

где  $K_l$  – коэффициент, учитывающий временное упрочнение бетона.

Для подтверждения принятых гипотез были обработаны экспериментальные данные, представленные на рисунках 1–6 и в монографии [6]. Результаты обработки представлены на рисунках 7–12.



**Рисунок 7. Изменение глубинного показателя во времени.**  
1, 2, 3, 4, 5 – составы отличаются видом наполнителя и технологией приготовления



Рисунок 8. Зависимость коэффициента переноса фронта деградации  $D$  и коэффициента диффузии  $D_m$  для контрольного ненаполненного состава цементной композиции от длительности действия среды

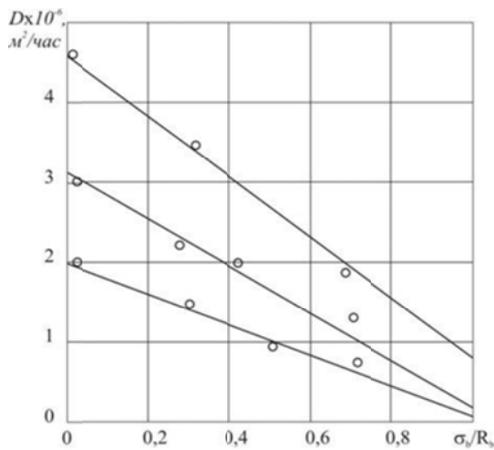


Рисунок 9. Зависимость коэффициента переноса фронта деградации от уровня сжимающих напряжений

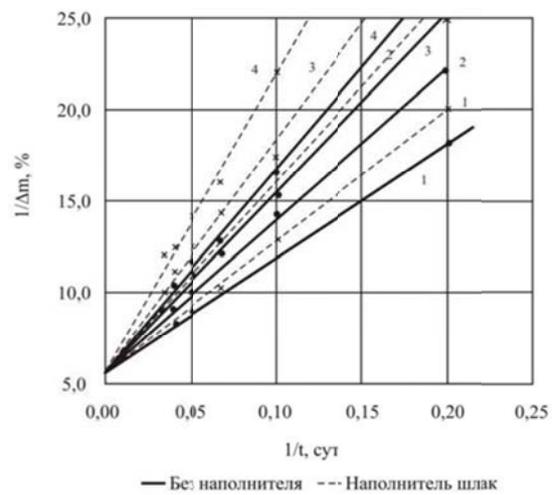


Рисунок 10. Изменение массы цементных композитов, наполненных шлаком, и без наполнителя при действии сжимающих напряжений:

1 – 0,0Р<sub>разр.</sub>; 2 – 0,3Р<sub>разр.</sub>; 3 – 0,5Р<sub>разр.</sub>; 4 – 0,7Р<sub>разр.</sub>

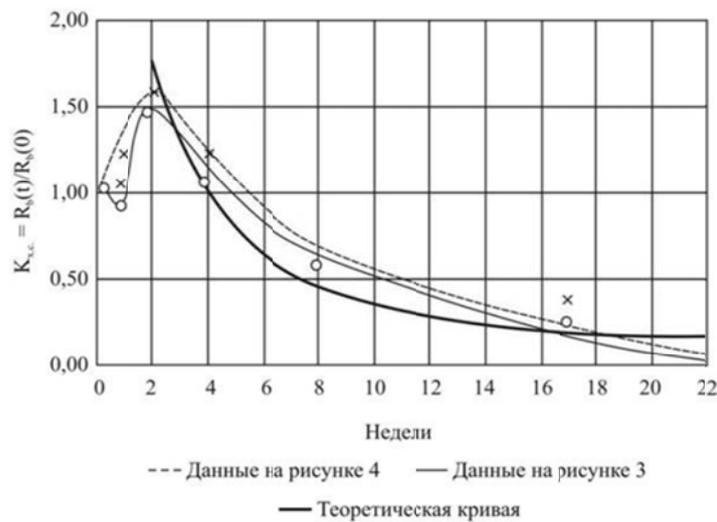


Рисунок 11. Изменение коэффициента химической стойкости  $K_{х.с.} = R_b(t)/R_b(0)$  во времени

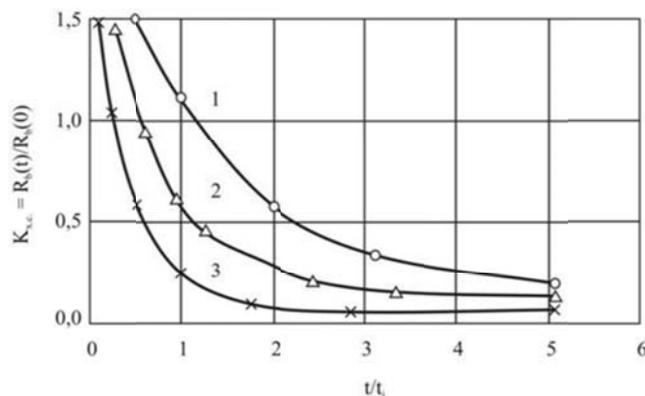


Рисунок 12. Аппроксимация экспериментальных данных. 1 –  $K_{01}$ , 2 –  $K_{02}$ , 3 –  $K_{03}$

Из анализа полученных данных можно сделать выводы.

1. Экспериментальные значения координаты фронта деструкции, полученные по изохронам деградации, ложатся (см. рис. 7) на прямые линии в координатах « $a - \sqrt{t}$ », следовательно, для определения координаты фронта разрушения структуры цементного бетона (глубинного показателя деградации) можно применять функцию (3), в которой  $k(\xi)$  зависит от инструментальной точности измерения твердости материала и химической активности реакционноспособных компонентов бетона и среды.

2. Величина коэффициента  $D$  меняется во времени (см. рис. 8) и зависит от уровня сжимающих напряжений (уменьшается по линейному закону с увеличением уровня сжимающих напряжений, см. рис. 9). Коэффициенты, характеризующие скорость продвижения фронта жидкости ( $D$ ) и деструкции ( $D_m$ ), сопоставимы по величине (см. рис. 8), имеют наибольшие значения в начальный момент времени взаимодействия бетона с агрессивной средой.

3. Предельная концентрация агрессивной среды, сорбированной в бетон, не зависит от уровня напряжений и температуры (см. рис. 10), и с достаточной достоверностью (коэффициент корреляции равен 0,97) определяется путем описания кривых сорбции уравнением (4). Графики сорбции, построенные в координатах  $(\frac{1}{\omega} - \frac{1}{t})$ , линейны, что хорошо согласуется с функцией (5).

4. Коэффициент, учитывающий интенсивность химического взаимодействия агрессивной среды с бетоном внешних слоев, хорошо описывается функциями вида 8 и 9 (см. рис. 11 и 12).

Полученные данные дают возможность экспериментально определить численные значения параметров деградации  $D_m$ ,  $D$ ,  $a$ ,  $\omega_0$ ,  $K_{xc}$ , которые можно применять для идентификации моделей деградации и при расчете долговечности железобетонных конструкций.

Рассмотрим изгибаемый элемент с прямоугольной формой поперечного сечения и одиночной арматурой (например, плита с арматурой в растянутой зоне). Предположим, что деградация бетона плиты вызвана жидкими агрессивными средами, действие которых обусловлено технологической линией, расположенной на вышележащих этажах. Тогда с учетом анализа экспериментальных данных, представленных в работе [6], возможные расчетные схемы прочности поперечного сечения, нормального к оси изгибаемого элемента с учетом линейных моделей деградации будут иметь вид (см. рис. 13).

На расчетных схемах показано, что координата фронта деградации ( $x_{ij} = a$ ) находится в пределах сжатой зоны ( $x_{ij} \leq x_i$ ); изохроны деградации, представленные эпюрами расчетного сопротивления, модуль деформаций бетона в пределах зоны деградации изменяются по различным линейным законам.

На рисунке 13 приняты обозначения:  $R_s$ ,  $R_b$  – расчетные сопротивления арматуры и бетона;  $x_i$  – высота координаты сжатой зоны;  $h$ ,  $h_0$  – полная и рабочая высота сечения;  $A_s$  – площадь поперечного сечения арматуры;  $b$  – ширина поперечного сечения элемента;  $x_{ij}$  – координата фронта деградации.

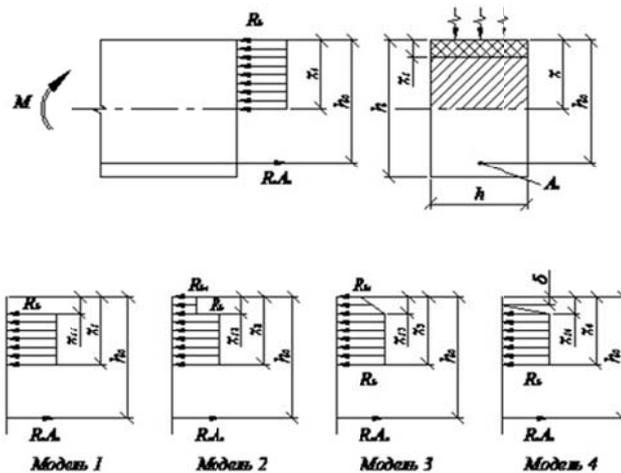


Рисунок 13. Феноменологические модели деградации

Введем обозначение:  $\xi_0 = x/h_0$ ;  $\xi_{ij} = x_{ij}/h_0$ ;  $\mu = A_s/bh_0$ . Тогда условие прочности можно записать в виде неравенства:

$$M \leq M_{ui}, \quad (10)$$

где  $M_{ui}$  – момент воспринимаемый сечением и определяемый по соответствующей расчетной модели  $i = 0, 1, 2, 3, 4$ .

Для расчетной модели при  $i = 0$  можно записать:

$$M_{u0} = R_b b x_0 (h_0 - 0,5 x_0), \quad (11)$$

так как  $R_b b x_0 = R_s A_s$ , то обозначив  $\xi_0 = x_0/h_0$ , получим  $\xi_0 = \mu(R_s/R_b)$ . Тогда формула 11 примет вид:

$$M_{u0} = \xi_0 (1 - 0,5 \xi_0) R_b b h_0^2 = \alpha_m R_b b h_0^2 \quad (12)$$

Рассмотрим расчетную модель 1, анализ которой дает возможность получить два уравнения:

$$\begin{aligned} M_{u1} &= R_b b (x_1 - x_{11}) [h_0 - 0,5(x_1 - x_{11}) - x_{11}] \\ R_b b (x_1 - x_{11}) &= R_s A_s. \end{aligned}$$

Так как

$$\frac{x_1}{h_0} = \xi_1; \quad \frac{x_{11}}{h_0} = \xi_{11}; \quad \frac{R_s}{R_b} \mu = \xi_0, \quad \text{то } \xi_0 = \xi_1 - \xi_{11}.$$

С учетом сделанных преобразований получаем формулу определения  $M_{u1}$  в следующем виде:

$$M_{u1} = M_{u0} \left( 1 - \frac{\xi_{11}}{1 - 0,5 \xi_0} \right). \quad (13)$$

Для расчетной модели 2, решая совместно уравнения, определяющие  $M_{u2}$  и  $\xi_2$ , получаем:

$$\begin{aligned} M_{u2} &= M_{u0} \left( 1 - \frac{\xi_{12} (1 - R_{b2}/R_b)}{1 - 0,5 \xi_0} + \frac{0,5 \xi_{12}^2 R_{b2}/R_{b0} (1 - R_{b2}/R_{b0})}{\xi_0 (1 - 0,5 \xi_0)} \right) \\ \xi_0 &= \xi_2 - \xi_{12} (1 - R_{b2}/R_b) \end{aligned} \quad (14)$$

Анализ модели 3 позволяет получить следующее выражение для определения прочности нормальных сечений:

$$M_{u3} = M_{u0} \left( 1 - \frac{0,5\xi_{13}(1-R_{b3}/R_b)}{1-0,5\xi_0} + \frac{\xi_{13}^2(1-R_{b3}/R_b) \left[ 0,125(1-R_{b3}/R_b) - \frac{1}{6} \right]}{\xi_0(1-0,5\xi_0)} \right) \quad (15)$$

$$\xi_0 = \xi_3 - 0,5\xi_{13}(1-R_{b3}/R_b) = \frac{R_s}{R_b} \mu.$$

Четвертая модель дает возможность получить формулу для определения  $M_{u4}$  вида:

$$M_{u4} = M_{u0} \left( 1 - \frac{(\xi_{14} + \delta/h_0)0,5}{1-0,5\xi_0} + \frac{(0,5\xi_{14} + 0,5\delta/h_0)^2 \frac{1}{6} - \frac{1}{3}\xi_{14}^2 \delta/h_0}{\xi_0(1-0,5\xi_0)} \right) \quad (16)$$

$$\xi_0 = \xi_4 - 0,5\xi_{14} - 0,5\delta/h_0 = \frac{R_s}{R_b} \mu.$$

Полученные выражения  $M_{ui}$  дают возможность определить деградационные функции  $\frac{M_{u1}}{M_{u0}} = D_i$ , выражения которых приведены в таблице 1.

**Таблица 1. Деградационные функции по несущей способности изгибаемых элементов**

Расчетная схема	$\xi_i = \frac{x_i}{h_0}$	$\frac{M_{u1}}{M_{u0}} = D_i$
0	$\xi_0$	1
1	$\xi_0 + \xi_{11}$	$1 - \frac{\xi_{11}}{1-0,5\xi_0}$
2	$\xi_0 + \xi_{12}(1-R_{b2}/R_b)$	$1 - \frac{\xi_{12}(1-R_{b2}/R_b)}{1-0,5\xi_0} + \frac{0,5\xi_{12}^2 R_{b2}/R_{b0}(1-R_{b2}/R_{b0})}{\xi_0(1-0,5\xi_0)}$
3	$\xi_0 + 0,5\xi_{13}(1-R_{b3}/R_b)$	$1 - \frac{0,5\xi_{13}(1-R_{b3}/R_b)}{1-0,5\xi_0} + \frac{\xi_{13}^2(1-R_{b3}/R_b) \left[ 0,125(1-R_{b3}/R_b) - \frac{1}{6} \right]}{\xi_0(1-0,5\xi_0)}$
4	$\xi_0 + 0,5\xi_{14} - 0,5\delta/h_0 = \frac{R_s}{R_b} \mu$	$1 - \frac{(\xi_{14} + \delta/h_0)0,5}{1-0,5\xi_0} + \frac{(0,5\xi_{14} + 0,5\delta/h_0)^2 \frac{1}{6} - \frac{1}{3}\xi_{14}^2 \delta/h_0}{\xi_0(1-0,5\xi_0)}$

Действие агрессивной среды в расчетных моделях определяется видом изохрон деградации; коэффициентом интенсивности химического взаимодействия (формулы 8 и 9); глубинным показателем  $a$  (формула 3). При выводе функций деградации принято  $a = x_{ij}$ ;  $x_{ij}/h_0 = \xi_{ij}$ .

$$\text{Принимаем: } \xi_{ij} = \frac{x_{ij}}{h_0} = \frac{a}{h_0} = \frac{0,1\sqrt{Dt}}{h_0}; \quad D = (4,5 \div 1,8) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{час}; \quad h_0 = 0,4 \text{ м};$$

$$R_{bi}/R_b = \frac{K_a}{t/t_a} = \frac{0,6}{t/1100}.$$

Селяев В.П., Неверов В.А., Селяев П.В., Сорокин Е.В., Юдина О.А. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций с учетом сульфатной коррозии бетона

Подставив эти функции в деградационные функции таблицы 1, можно определить как меняются их значения от длительности действия сульфат-ионов ( $t$ , час); высоты поперечного сечения изгибаемого элемента ( $h_0$ , м); относительного содержания арматуры  $J_1$ ; отношения  $R_b/R_b$ .

На рисунке 14 представлены графики изменения деградационных функций во времени, анализ которых показывает, что для обеспечения безопасности, надежности прогноза, оценку долговечности железобетонных элементов следует проводить с применением модели 1 или 2. Модель 3 дает более высокие оценки долговечности. Потеря 20% несущей способности по прогнозу с применением моделей 1 и 2 наступит через 10 лет, модели 3 – через 15 лет. Снижение несущей способности на 50% наступит в первом случае через 80 лет, во втором – через 100 лет.

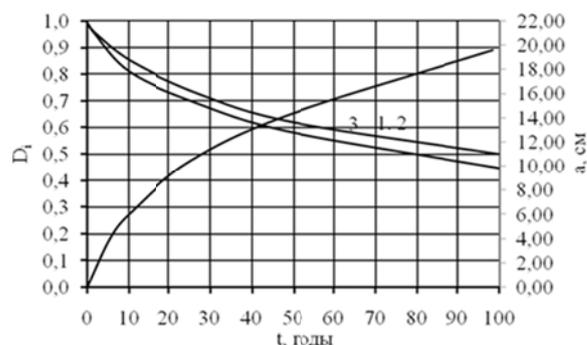


Рисунок 14. Деградационные функции для расчетных схем 1, 2, 3

### Выводы

1. Предложена методика расчета долговечности строительных конструкций, основанная на применении метода предельных состояний и деградационных функций.
2. Определены основные параметры деградационных моделей:  $a$  – глубинный показатель;  $D_m$  – коэффициент переноса энергии разрушения;  $K_{xc}$  – показатель интенсивности изменения прочности материала на поверхности изделия (коэффициент химического сопротивления);  $\omega_0$  – сорбционная емкость материала. Применение этих параметров дает возможность прогнозировать долговечность, надежность, остаточный ресурс железобетонных конструкций в условиях действия сульфатных сред.
3. Предложены методы экспериментального определения параметров деградации.

### Литература

1. Бондаренко В.М., Ивахнюк В.М. Фрагменты теории силового сопротивления бетона поврежденного коррозией // Бетон и железобетон. 2003. №5. С. 21.
2. Бондаренко В.М. К вопросу о влиянии анизотропии и коррозионных повреждений на силовое сопротивление железобетона при закономерном нагружении // Academia. Архитектура и строительство. 2011. №1. С. 101–105.
3. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2013. №2. С. 28–32.
4. Рахимбаев Ш.М. Кинетика процессов кольматации при химической коррозии цементных систем // Бетон и железобетон. 2012. №6. С. 16–17.
5. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. Монография. М.: АСВ, 2004. 472 с.
6. Селяев В.П., Соломатов В.И., Ошкина Л.М. Химическое сопротивление наполненных цементных композитов. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2001. 152 с.
7. Folic R. Durability design of concrete structures – Part 1: analysis fundamentals // Architecture and Civil Engineering. 2009. Vol. 7. No. 1. Pp. 1–18.
8. Folic R., Zenunovic D. Durability design of concrete structures – Part 2: modeling and structural assessment // Architecture and Civil Engineering. 2010. Vol. 8. No. 1. Pp. 45–66.
9. Ferreira M, Jalali S. Probabilistic assessment of the durability performance of concrete structures // Engenharia Civil. 2004. No. 21. Pp. 39–48.
10. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. М.: Стройиздат, 1973. 432 с.
11. Рахимбаев Ш.М. Процесс кольматации при химической коррозии цементных систем. Физическая модель // Бетон и железобетон. 2013. №4. С. 30–32.

Селяев В.П., Неверов В.А., Селяев П.В., Сорокин Е.В., Юдина О.А. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций с учетом сульфатной коррозии бетона

12. Гилязидинова Н.В., Рудковская Н.Ю., Санталова Г.Н. Коррозионная стойкость шлакобетонов // Бетон и железобетон. 2013. №3. С. 24–25.
13. Рахимбаев Ш.М., Карпаева Е.Н., Толынина Н.М. О выборе типа цемента на основе теории кольматации при сложном составе агрессивной среды // Бетон и железобетон. 2012. №5. С. 25–26.
14. Рахимбаев Ш.М. Кинетика процессов кольматации при химической коррозии цементных систем // Бетон и железобетон. 2012. №6. С. 16–17.
15. Леонович С.Н., Прасол А.В. Модели периода иницирования коррозии арматуры // Строительные материалы. 2012. №9. С. 74–75.
16. Леонович С.Н., Прасол А.В. Железобетон в условиях хлоридной коррозии: деформирование и разрушение // Строительные материалы. 2013. №5. С. 94–96.
17. Кантор П.Л., Кантор С.Л., Латышов В.М. Прогнозирование скорости коррозии водоотводящих железобетонных коллекторов с учетом плотности бетона // Промышленное и гражданское строительство. 2012. №1. С. 44–47.
18. Уткина В.Н., Селяев В.П., Соломатов В.И. Определение деградационных функций методом микротвердости. Расчет элементов конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред: Меж.вуз. науч. сб. Саратов, 1985. С. 50–53.
19. Zivica V., Bajza A. Acidic attack of cement based materials – a review. Part 1. Principle of acidic attack // Construction and Building Materials. 2000. Vol. 15. No. 12. Pp. 331–340.
20. Mohebhmoghadam B., Dianat S.H. Evolution of the corrosion and strength of concrete exposed to sulfate solution // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2012. Vol. 3. Issue 2. Pp. 198–206.
21. Fatima T., Arab N., Zemskov E.P., Muntean A. Homogenization of a reaction – diffusion system modeling sulfate corrosion of concrete in locally periodic perforated domains // Journal of Engineering Mathematics. 2011. Vol. 69. Issues 2–3. Pp. 261–276.
22. Stevulova N., Ondrejka Harbulakova V., Estokova A., Luptakova A., Repka M. Study of sulphate corrosion simulations on concrete composites // International Journal of Energy and Environment. 2012. Vol. 6. No. 2. Pp. 276–283.
23. Tang L. Chloride transport in concrete – Measurement and Prediction. PhD thesis. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 1996.
24. Frederiksen J.M., Mejlbro L., Poulsen E. The HETEK model of chloride ingress into concrete made simpler by approximations // Proceedings of 2nd International RILEM Workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete. Paris, 2000. Pp. 317–336.
25. Hobbs D.W. Chloride ingress and chloride-induced corrosion in reinforced concrete members // Proceedings of the 4th International Symposium On Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, July 1–4, 1996. Cambridge, UK, 1996. Pp. 124–135.
26. Seljaev V., Weiss V. Statisticka teorie pevnosti a degradance konstrukcnich plastu. P.c.s // Vuzkum a hodnoceh: Vztahu Vlivu prostredi nazivotnost konstrukci a material. Praha, 1978. Pp. 71–89.
27. Селяев В.П. Основы теории расчета композиционных конструкций с учетом действия агрессивных сред: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. Москва, 1984. 36 с.
28. Селяев В.П., Ошкина Л.М., Селяев П.В., Сорокин Е.В. Исследование химической стойкости цементных бетонов с учетом сульфатной коррозии // Региональная архитектура и строительство. 2013. №1(15). С. 4–11.
29. Соломатов В.И., Селяев В.П. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов. М.: Стройиздат, 1987. 264 с.

*Владимир Павлович Селяев, г. Саранск, Россия  
Тел. раб.: +7(8342)47-71-56; эл. почта: mossrorm@yandex.ru*

*Вячеслав Александрович Неверов, г. Саранск, Россия  
Тел. раб.: +7(8342)47-71-56; эл. почта: ua4uu@mail.ru*

*Павел Владимирович Селяев, г. Саранск, Россия  
Тел. раб.: +7(8342)47-71-56; эл. почта: ntorm80@mail.ru*

*Евгений Вячеславович Сорокин, г. Саранск, Россия  
Тел. раб.: +7(8342)47-71-56; эл. почта: evssar@mail.ru*

*Ольга Александровна Юдина, г. Саранск, Россия  
Тел. раб.: +7(8342)47-71-56; эл. почта: zaichyshka90@mail.ru*

© Селяев В.П., Неверов В.А., Селяев П.В., Сорокин Е.В., Юдина О.А., 2014

Селяев В.П., Неверов В.А., Селяев П.В., Сорокин Е.В., Юдина О.А. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций с учетом сульфатной коррозии бетона

doi: 10.5862/MCE.43.5

## Predicting the Durability of Concrete Structures, including Sulfate Corrosion of Concrete

**V.P. Selyaev**

Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia  
+7(8342)47-71-56; e-mail: mossrorm@yandex.ru

**V.A. Neverov**

Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia  
+7(8342)477156; e-mail: ua4uu@mail.ru

**P.V. Selyaev**

Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia  
+7(8342)47-71-56; e-mail: ntorm80@mail.ru

**E.V. Sorokin**

Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia  
+7(8342)47-71-56; e-mail: evssar@mail.ru

**O.A. Yudina**

Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia  
+7(8342)47-71-56; e-mail: zaichyshka90@mail.ru

### Key words

durability; sulfate corrosion of concrete; destruction of cement; degradation function

### Abstract

Multiple data on the examination of concrete structures indicate that under the influence of various factors (temperature, humidity, gaseous medium) carrying capacity and rigidity during operation are reduced. The problems of assessing the residual life and durability of concrete structures are considered in the article.

Experimental studies on the interaction of the concrete samples with aggressive sulfate medium are conducted. By measuring the micro-hardness, isochrones of degradations, enabling experiments to determine the rate of advance of the destruction front deep into the product; intensity changes in the durability properties of the material surface and other features which characterize the degradation process were obtained.

The article investigates the mechanisms of corrosion processes in reinforced concrete in condition of sulfate corrosion. The paper proposes the calculation model and the method that predict the durability of concrete structures.

### References

1. Bondarenko V.M., Ivakhnyuk V.M. *Beton i zhelezobeton*. 2003. No.5. P. 21. (rus)
2. Bondarenko V.M. *Academia. Arkhitektura i stroitelstvo*. 2011. No.1. Pp. 101–105. (rus)
3. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. *Industrial and Civil Engineering*. 2013. No.2. Pp. 28–32. (rus)
4. Rakhimbayev Sh.M. *Beton i zhelezobeton*. 2012. No.6. Pp. 16–17. (rus)
5. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. *Raschetnyye modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona. Monografiya* [Design model of power resistance of reinforced concrete. Monograph]. Moscow: ASV, 2004. 472 p. (rus)
6. Selyayev V.P., Solomatov V.I., Oshkina L.M. *Khimicheskoye soprotivleniye napolnennykh tsementnykh kompozitov* [Chemical resistance of filled cement composite]. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2001. 152 p. (rus)
7. Folic R. Durability design of concrete structures – Part 1: analysis fundamentals. *Architecture and Civil Engineering*. 2009. Vol. 7. No. 1. Pp. 1–18.
8. Folic R, Zenunovic D. Durability design of concrete structures – Part 2: modeling and structural assessment. *Architecture and Civil Engineering*. 2010. Vol. 8. No.1. Pp. 45–66.

Selyaev V.P., Neverov V.A., Selyaev P.V., Sorokin E.V., Yudina O.A. Predicting the durability of concrete structures, including sulfate corrosion of concrete

9. Ferreira M., Jalali S. Probabilistic assessment of the durability performance of concrete structures. *Engenharia Civil*. 2004. No.21. Pp. 39–48.
10. Aleksandrovskiy S.V. *Raschet betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksiy na izmeneniya temperatury i vlazhnosti s uchetom polzuchesti* [Analysis of concrete and reinforced concrete structures on changes in temperature and humidity with account of creeping]. Moscow: Stroyizdat, 1973. 432 p. (rus)
11. Rakhimbayev Sh.M. *Beton i zhelezobeton*. 2013. No.4. Pp. 30–32. (rus)
12. Gilyazidinova N.V., Rudkovskaya N.Yu., Santalova G.N. *Beton i zhelezobeton*. 2013. No.3. Pp. 24–25. (rus)
13. Rakhimbayev Sh.M., Karpayeva Ye.N., Tolynina N.M. *Beton i zhelezobeton*. 2012. No.5. Pp. 25–26. (rus)
14. Rakhimbayev Sh.M. *Beton i zhelezobeton*. 2012. No.6. Pp. 16–17. (rus)
15. Leonovich S.N., Prasol A.V. *Construction materials*. 2012. No.9. Pp. 74–75. (rus)
16. Leonovich S.N., Prasol A.V. *Construction materials*. 2013. No.5. Pp. 94–96. (rus)
17. Kantor P.L., Kantor S.L., Latyshov V.M. *Industrial and Civil Engineering*. 2012. No.1. Pp. 44–47. (rus)
18. Utkina V.N., Selyayev V.P., Solomatov V.I. *Opredeleniye degradatsionnykh funktsiy metodom mikrotverdosti. Raschet elementov konstruksiy, podvergayushchikhsya vozdeystviyu agressivnykh sred: Mez. vuz. nauch. sb.* [Estimation of degradation functions by microhardness method. Calculation of structure elements, undergoing the corrosive medium: Interuniversity scientific collection]. Saratov, 1985. Pp. 50–53. (rus)
19. Zivica V., Bajza A. Acidic attack of cement based materials – a review. Part 1. Principle of acidic attack. *Construction and Building Materials*. 2000. Vol. 15. No.12. Pp. 331–340.
20. Mohehimoghaddam B., Dianat S.H. Evolution of the corrosion and strength of concrete exposed to sulfate solution. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2012. Vol. 3. Issue 2. Pp. 198–206.
21. Fatima T., Arab N., Zemskov E.P., Muntean A. Homogenization of a reaction – diffusion system modeling sulfate corrosion of concrete in locally periodic perforated domains. *Journal of Engineering Mathematics*. 2011. Vol. 69. Issues 2–3. Pp. 261–276.
22. Stevulova N., Ondrejka Harbulakova V., Estokova A., Luptakova A., Repka M. Study of sulphate corrosion simulations on concrete composites. *International Journal of Energy and Environment*. 2012. Vol. 6. No.2. Pp. 276–283.
23. Tang L. *Chloride transport in concrete – Measurement and Prediction*. PhD thesis. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 1996.
24. Frederiksen J.M., Mejlbro L., Poulsen E. The HETEK model of chloride ingress into concrete made simpler by approximations. *Proceedings of 2nd International RILEM Workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete*. Paris, 2000. Pp. 317–336.
25. Hobbs D.W. Chloride ingress and chloride-induced corrosion in reinforced concrete members. *Proceedings of the 4th International Symposium on Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, July 1–4, 1996. Cambridge, UK, 1996*. Pp. 124–135.
26. Seljaev V., Weiss V. Statisticka teorie pevnosti a degradance konstrukcnych plastu. P.c.s. *Vuzkum a hodnoceh: Vztahu Vlivu prostredi nazivotnost konstrukci a material*. Praha, 1978. Pp. 71–89.
27. Selyayev V.P. *Osnovy teorii rascheta kompozitsionnykh konstruksiy s uchetom deystviya agressivnykh sred* [Fundamentals of composite structures design theory with account of corrosive medium affect]. Abstract of doctoral dissertation. Moscow, 1984. 36 p. (rus)
28. Selyayev V.P., Oshkina L.M. Selyayev P.V., Sorokin Ye.V. *Regional Architecture and Engineering*. 2013. No.1(15). Pp. 4–11. (rus)
29. Solomatov V.I., Selyayev V.P. *Khimicheskoye soprotivleniye kompozitsionnykh stroitelnykh materialov* [Chemical resistance of composite construction materials]. Moscow: Stroyizdat, 1987. 264 p. (rus)

**Full text of this article in Russian: pp. 41–52**