



УДК 539.3

**Каюмов Рашит Абдулхакович**

доктор физико-математических наук, профессор

E-mail: [kayumov@rambler.ru](mailto:kayumov@rambler.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

**Кашафдинова Алсу Фаритовна**

инженер

E-mail: [kashafdinovaalsu@gmail.com](mailto:kashafdinovaalsu@gmail.com)

**ООО «Восток-С»**

Адрес организации: 420111, Россия, г. Казань, ул. Московская, д. 27

### **Методика описания процесса деградации бетонных конструкций под влиянием солевой коррозии**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* В настоящее время актуальной является проблема разработки теоретических методов оценки долговечности строительных конструкций, работающих при совместном действии силовых факторов и агрессивных сред. Цель исследования – создать математическую модель, описывающую процесс деградации бетона, находящегося под воздействием солевого раствора, позволяющую рассчитать несущую способность в различные моменты времени и дать оценку долговечности конструкции.

*Результат.* Рассматривается задача диффузии раствора соли в бетон и задача кристаллизации этой соли в порах бетона. Приведён пример обработки результатов эксперимента по определению коэффициента диффузии жидкости в бетоне. Решение проводится в конечных разностях по времени и по координате. Предложено соотношение в виде дифференциального уравнения для определения скорости кристаллизации соли в порах бетона и его решение. Приведены результаты экспериментов по определению прочности образцов, подвергшихся воздействию солевого раствора в течение 3-х и 6-и месяцев. Представлена оценка влияния массы кристаллизовавшейся соли в порах материала на прочностные свойства материала. Зависимость прочности бетона от концентрации солей в нём аппроксимируется функцией, которая позволяет определить значение прочности в различных точках стены к определённому моменту времени.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной области состоит в возможности прогнозировать падение с течением времени несущей способности бетонной стены, подверженной влиянию солевого раствора.

**Ключевые слова:** бетон, долговечность, прочность, коррозия, деградация, соль.

#### **Введение**

Новым направлением в развитии науки о сопротивлении материалов стали работы, посвящённые изучению влияния агрессивных (твёрдых, жидких, газообразных и других) сред на процессы деформирования и разрушения материалов [1].

В классической теории сопротивления материалов эти воздействия учитываются с помощью коэффициентов условий работы, которые Н. Стрелецким названы «коэффициентами незнания» и которые не могут в полной мере учесть воздействие агрессивных факторов. Использование таких коэффициентов зачастую приводит к преждевременному выходу из строя конструкции и элементов. Неоднократно обращалось внимание на то, что этот пробел в теории сопротивления материалов необходимо заполнить [2].

В настоящее время накоплен определённый объём экспериментальных и теоретических знаний, на основании которых можно математически описать влияние агрессивных сред на механические свойства материалов, из которых выполнена конструкция, и на её несущую способность.

Одним из распространённых агрессивных факторов, влияющих на долговечность материала конструкции и самой конструкции в целом, являются соли. Некоторые

элементы сооружения подвергаются постоянному воздействию солей непосредственно в растворённом состоянии, а иногда в виде пара. При этом происходит кристаллообразование в элементах конструкций зданий и сооружений (особенно в процессе попеременного намокания и высушивания). В связи с этим наблюдается концентрация соли как на поверхности материала, так и в его толще, что естественно не может не сказаться на прочности конструкции каркаса.

Цель исследования состояла в создании математической модели, которая описывала бы процесс деградации бетона, находящегося под воздействием солевого раствора, позволяла бы рассчитать несущую способность в различные моменты времени и дать оценку долговечности конструкции.

Объектом исследования является бетон под воздействием солевого раствора.

Предмет исследования – процесс солевой коррозии элементов бетонных конструкций, находящихся под воздействием вод с высоким содержанием солей.

### Постановка задачи и методика её решения

Сначала рассмотрим задачу диффузии раствора соли в бетонную стену. Считаем, что перенос вещества обусловлен перепадом концентраций и определяется по следующему закону:

$$\lambda \times \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{\partial C}{\partial t}, C = C(x, t). \quad (1)$$

Здесь  $C = C(x, t)$  – содержание жидкости в среде бетона,  $\lambda$  – коэффициент диффузии раствора,  $x$  – координата по толщине стены;  $t$  – время. Процесс диффузии жидкости зависит не только от времени и координаты сечения колонны, но и от параметров, характеризующих влияние на механические свойства материала таких факторов как состав бетонной смеси, способы твердения, производства и т.п.

Считаем, что соль в стену проникает согласно схеме, показанной на рис. 1а. Разобьём сечение стенки на элементарные слои толщиной, например, 1 см. Очевидно, что поток раствора соли будет доходить до различных слоёв в разное время. Так, например, к первому (граничному) слою поток подходит в начальный момент времени  $t_0$ , так как раствор «омывает образец»; во второй слой раствор проникнет к моменту времени  $t_1$ , в третий – в момент времени  $t_2$  и т.д.

На рис. 1а представлено разделение на элементарные слои и распределение концентрации соли в них.

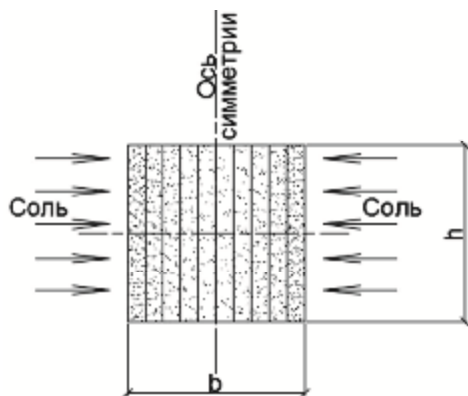


Рис. 1а. Схема воздействия раствора, и разделение области на слои

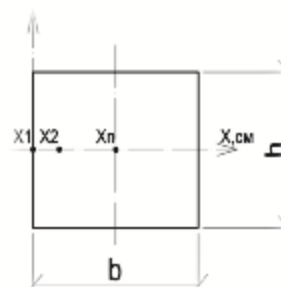


Рис. 1б. Система координат

Из уравнения (1) можно найти время, которое необходимо раствору, чтобы достигнуть  $i$ -ого слоя.

Введём систему координат так, как показано на рис. 1б. Граничные условия запишем в виде:

$$x=0: C(0, t) = C_{max} = const,$$

где  $C_{max}$  – максимальное содержание жидкости в среде. В середине образца скорость изменения концентраций равна 0. Это можно записать следующим образом:

$$x = \frac{b}{2}: \frac{\partial C}{\partial t} (b/2, t) = 0.$$

Начальное условие имеет вид:

$$t=0: C(x, 0) = C_{min} = const,$$

где  $C_{min}$  – содержание жидкости в бетоне до воздействия влаги.

Решение будем проводить в конечных разностях и по времени, и по координате. Обозначим:  $C_i^j$  – количество жидкости в точке  $x=x_i$  при  $t=t_j$ . Тогда запишем уравнения диффузии следующим образом.

Шаг по времени № 1. Запишем уравнение (1) в конечных разностях для точки  $x=x_2$  в момент времени  $t=t_2=\Delta t$ :

$$t = t_2: \frac{C_3^{(1)} - 2C_2^{(1)} + C_1^{(1)}}{Dx^2} \Delta t = \frac{C_2^{(2)} - C_2^{(1)}}{Dt}.$$

Здесь  $C_3^{(1)} = C_{min}$ ,  $C_2^{(1)} = C_{min}$ ,  $C_1^{(1)} = C_{max}$ .

Отсюда находим  $C_2^{(2)}$ .

Шаг по времени № 2. Далее запишем уравнение (1) в конечных разностях для точки  $x=x_2$  в момент времени  $t=t_3=2\Delta t$ :

$$t = t_3: \frac{C_3^{(2)} - 2C_2^{(2)} + C_1^{(2)}}{Dx^2} \Delta t = \frac{C_2^{(3)} - C_2^{(2)}}{Dt}.$$

Здесь  $C_3^{(2)} = C_{min}$ ,  $C_1^{(2)} = C_{max}$ , а  $C_2^{(2)}$  найден на 1-ом шаге. Отсюда находим  $C_2^{(3)}$ .

Далее запишем уравнение (1) в конечных разностях для точки  $x=x_3$ :

$$t = t_3: \frac{C_4^{(2)} - 2C_3^{(2)} + C_2^{(2)}}{Dx^2} \Delta t = \frac{C_3^{(3)} - C_3^{(2)}}{Dt}.$$

Здесь  $C_4^{(2)} = C_3^{(2)} = C_{min}$ , а  $C_2^{(2)}$  найдено на 1-ом шаге. Отсюда находим  $C_3^{(3)}$ .

Таким образом, последовательно находим значения  $C$  в точках  $x=x_i$  в моменты времени  $t=t_j$ .

Коэффициент диффузии  $\lambda$  нужно находить из эксперимента. Для этого проводился следующий эксперимент. Бетонный образец с габаритами  $10 \times 10 \times 10$  см был взвешен в начальном состоянии, т.е. в сухом виде. Затем образец был погружен в воду и периодически взвешивался. Вычислялась масса поглощённой образцом воды в различные моменты времени. Таким образом, была получена зависимость массы поглощённой образцом воды от времени (рис. 2).

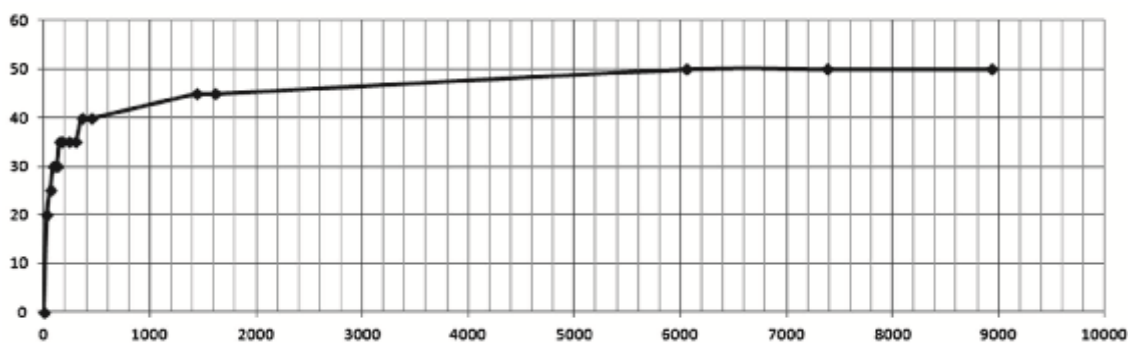


Рис. 2. Зависимость массы поглощённой воды (по оси ординат, в гр) от времени (по оси абсцисс, в мин)

Зная данную зависимость и используя уравнение диффузии воды в бетоне (1), перебором значений  $\lambda$  и сопоставлением расчетных значений массы поглощённой жидкости с экспериментальными значениями, был найден коэффициент диффузии раствора в бетоне  $\lambda = 59 \text{ см}^2/\text{сут}$ .

Далее были проведены эксперименты по определению несущей способности образцов, которые были подвержены воздействию раствора соли, в зависимости от времени (табл.). Были испытаны 3-и одинаковых образца с габаритами  $10 \times 10 \times 10$  см.

Первый из образцов был контрольным. Второй образец был предварительно уложен в раствор морской соли с концентрацией 3,47 %, которую поддерживали на протяжении всего времени проведения эксперимента. Концентрация соли была принята равной средней солености мирового океана – 34,7 г/л. Образец находился в растворе до момента времени  $t_1$ , после чего он был вынут, высушен и подвержен испытанию на прессе, что позволило определить несущую способность образца, насыщенного солью по истечении первого промежутка времени. Аналогичный эксперимент был произведен с третьим образцом, который был подвержен солевому воздействию до момента времени  $t_2$ . Таким образом, по результатам 3-х экспериментов можно построить кривую зависимости от времени несущей способности образца, подверженного влиянию агрессивного фактора.

Таблица

## Обобщение результатов эксперимента

Время замачивания (№ образца), мес.	Площадь приложения нагрузки $A_{общ}$ , см <sup>2</sup>	Предельная нагрузка $P$ , кН	Прочность бетона $R_b$ , МПа
$t_0=0$ (образец № 1)	111,555	979	87,76
$t_1=3$ месяца (образец № 2)	101,505	1037	102,2
$t_2=6$ месяцев (образец № 3)	100	1090	109,0

Из рис. 2 видно, что происходит упрочнение бетона, на самом же деле график должен иметь ниспадающую ветвь при больших временах. При воздействии солевого раствора бетон сначала упрочняется до определенного момента времени, а затем постепенно теряет свои прочностные свойства. Данный факт известен и описан, например в [3]. Время проведения эксперимента было ограничено, поэтому получены результаты только фазы упрочнения. Далее приведём соотношения, которые предлагается использовать для описания этого процесса.

Известно, что с течением времени соль в образце начнёт кристаллизоваться. Максимальный объём кристаллов соли будет достигнут в момент заполнения всех пор образца.

Будем описывать процесс кристаллизации соотношением:

$$\frac{dM}{dt} = a / (1 + gM)^b, \quad a = a(C), \quad b = b(C), \quad g = g(C). \quad (2)$$

Здесь  $M$  – масса соли, которая кристаллизовалась в образце, отнесённая к массе бетона до начала процесса кристаллизации;  $t$  – время,  $\frac{dM}{dt}$  – скорость кристаллизации соли;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – коэффициенты, которые могут быть найдены из эксперимента. В начальный момент времени скорость кристаллизации соли максимальна и равна параметру  $\alpha$ . С течением времени при росте массы кристаллизовавшейся соли происходит снижение скорости кристаллизации.

Для упрощения решения в запас долговечности можно считать, что процесс кристаллизации соли в  $i$ -ом слое начинается в момент достижения раствором данного слоя. Т.е., соль начнёт кристаллизоваться в различных слоях хотя и в разное время, но в независимости от того, какова влажность в данном слое. Условимся считать, что процесс кристаллизации в элементарном объёме начинается непосредственно в момент начала воздействия раствора соли на этот объём образца. Это означает, что  $\alpha = const$ ,  $\beta = const$ ,  $\gamma = const$ . Тогда решение уравнения (2) может быть записано в аналитическом виде:

$$M = \frac{\alpha}{g} [1 + \alpha g(1 + b)]^{\frac{1}{1+b}} - 1 \cdot \frac{\alpha}{g}. \quad (3)$$

Выражение для определения прочности  $R_{b,i}^j = f(M)$  в  $i$ -ом слое на единицу площади в момент времени  $t = t_j$  примем в виде:

$$R_{b,i}^j = R_{b0} (1 + m M_i^j) / (1 + n (M_i^j)^2), \quad (4)$$

где  $M_i^j$  – доля массы соли в образце в точке  $x = x_i$  при  $t = t_j$ ;  $R_{b0}$  – начальная прочность бетона;  $m$  и  $n$  – параметры, характеризующий влияние на механические свойства материала образца различных факторов (состава бетонной смеси, способ твердения, производства и т.п.).

Зависимость представлена именно в таком виде с той целью, чтобы можно было учесть фазу упрочнения. Далее с увеличением массы кристаллизовавшейся в порах бетона соли функция  $R_{b,i}^j$  будет стремиться к 0, но никогда не пересечет ось абсцисс.

Из эксперимента нам известны значения  $R_{b0}$ ,  $P^{3.мес}$ ,  $P^{6.мес}$  в среднем сечении образца. Суммарная нагрузка в момент времени  $t=t_j$  на сечение образца вычисляется по соотношению:

$$P^j = \iint_A R_{b,i}^j dA_i,$$

где  $dA_i$  – единичная площадь области сечения образца с равной концентрацией солей. Интегрирование будем вести численно. Разобьём квадрат на малые площадки с размерами 1×1 см (рис. 3).

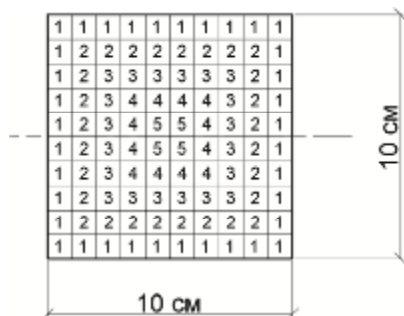


Рис. 3. Разбиение сечения на элементарные площадки с размерами 1×1 см

Из рис. 3 видно, что имеем 5 областей с равной концентрацией: квадратов № 1 – 36 шт., т.е. 36 см<sup>2</sup>, № 2 – 28 шт., т.е. 28 см<sup>2</sup>, № 3 – 20 шт., т.е. 20 см<sup>2</sup>, № 4 – 12 шт., т.е. 12 см<sup>2</sup>, № 5 – 4 шт., т.е. 4 см<sup>2</sup>, Площадь квадрата  $\Delta A = 1 \times 1 = 1$  см<sup>2</sup>.

Прочность единичной площадки i-ого слоя определяется по формуле (4). Тогда в момент времени  $t=t_j$  суммарная нагрузка будет равна:

$$P^j = \iint_A P_i^j = R_{b0} \iint_A [(1 + m M_i^j) / (1 + n (M_i^j)^2) A_i] dA_i.$$

Система уравнений для определения параметров m и n примет вид:

$$\begin{cases} P^{3.мес} = \iint_A P_i^{3.мес} = R_{b0} \iint_A \frac{(1 + m M_i^{3.мес})}{(1 + n (M_i^{3.мес})^2)} A_i dA_i \\ P^{6.мес} = \iint_A P_i^{6.мес} = R_{b0} \iint_A \frac{(1 + m M_i^{6.мес})}{(1 + n (M_i^{6.мес})^2)} A_i dA_i \end{cases} \quad (5)$$

Для отыскания неизвестных коэффициентов  $\alpha, \beta, \gamma$  необходимо произвести следующий эксперимент. Замеряется масса образца в сухом состоянии, а затем образец опускается в раствор соли и периодически подвергается взвешиванию до того момента, когда масса поглощённой жидкости не стабилизируется. Через некоторое время масса образца будет увеличиваться лишь за счет образования кристаллов солей. Таким образом, необходимо произвести замеры массы образца в разные моменты времени, чтобы отследить рост массы кристаллов солей. Схема кристаллообразования представлена на рис. 4.

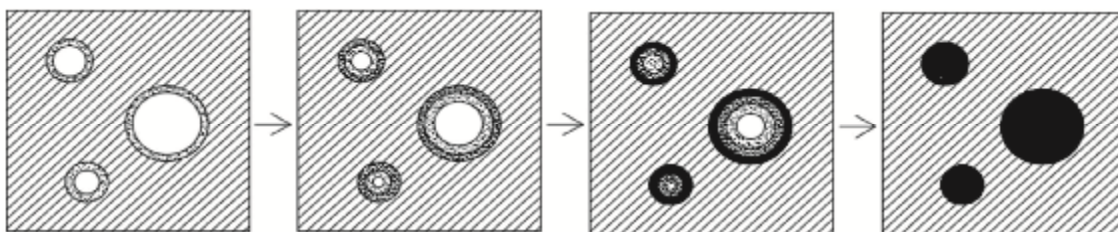


Рис. 4. Схема кристаллообразования солей в порах с течением времени

По итогам эксперимента может быть получена зависимость от времени массы кристаллов соли, которые образовались в порах образца (рис. 5).

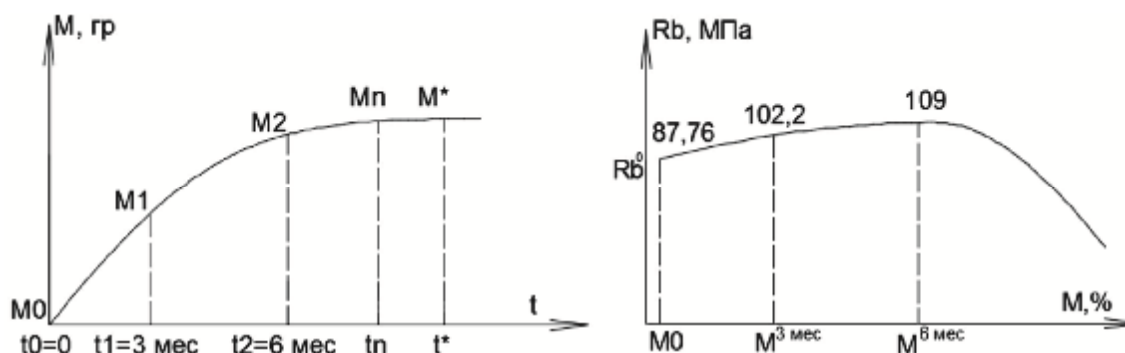


Рис. 5. Зависимости от времени массы образовавшихся кристаллов соли и зависимости прочности бетона от концентрации солей ( $t^*$  – время максимального кристаллообразования,  $M^*$  – максимальная масса кристаллов солей в порах бетона)

Из сопоставления решения уравнения (2) и экспериментальных данных находим параметры  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . Для уменьшения искомых параметров можно, например, положить  $\gamma=1$ . Зная параметры  $\alpha$  и  $\beta$  определим согласно уравнению (3) массу кристаллизовавшейся в порах бетона соли в момент времени  $t=t_j$ .

Из ранее проведенного эксперимента нам известны значения прочности бетона в начальный момент времени, по истечении 3 и 6 месяцев. Решая систему уравнений (5) определяем значения параметров  $m$  и  $n$ .

Для демонстрации методики расчета  $m$  и  $n$  используем следующие экспериментальные данные и предположения. Считаем, что время диффузии значительно меньше, чем 3 и 6 месяцев. Тогда примем в первом уравнении системы (13)  $t=3$  мес, а во втором –  $t=6$  мес. Можно также принять, что в начальном состоянии  $M_0=0$ . Пусть  $M^{3\text{мес}}=10$  гр/гр,  $M^{6\text{мес}}=22$  гр/гр. Тогда все  $P_i$  одинаковы в один и тот же момент времени, и система (5) примет вид:

$$\begin{cases} P^{3\text{мес}} = R_{b0} (1 + mM^{3\text{мес}}) / (1 + n(M^{3\text{мес}})^2) A \\ P^{6\text{мес}} = R_{b0} (1 + mM^{6\text{мес}}) / (1 + n(M^{6\text{мес}})^2) A \end{cases}$$

где  $A$  – площадь приложения нагрузки.

Решение системы дает следующие результаты для  $m$  и  $n$ :  $m=1,5102$ ;  $n=0,0036$ .

Зависимость  $R_b$  от  $M$  приведена на рис. 5.

### Заключение

1. В данной работе представлены методики описания процесса диффузии солевого раствора в бетонной стенке, описания процесса кристаллизации соли в порах бетона, оценки влияния массы кристаллизовавшейся соли в порах материала на прочностные свойства материала и методика оценки несущей способности бетонных конструкций под действием солевой коррозии.

2. Приведён пример обработки результатов эксперимента по определению коэффициента диффузии жидкости в бетоне. Расчет проведен методом конечных разностей как по времени, так и по координате.

3. Приведены результаты экспериментов по определению прочности образцов, подвергшихся воздействию солевого раствора в течение 3-х и 6-ти месяцев.

4. Предложено соотношение в виде дифференциального уравнения для определения скорости кристаллизации соли в порах бетона и его решение. Описывается способ идентификации параметров этого соотношения по результатам экспериментов по выдержке образцов в солевом растворе.

5. Предложено соотношение, аппроксимирующее зависимость прочности бетона от удельной массы кристаллизовавшейся соли. Описана методика, позволяющая определить коэффициенты этой аппроксимирующей функции по результатам испытаний на прочность образцов, выдержанных разное время в солевом растворе, и приведен пример их расчета.

## Список библиографических ссылок

1. Соломатов В. И., Селяев В. П. Химическое сопротивление материалов. М. : Рос. акад. архитектуры и строит. наук; Мордов. гос. ун-т; Моск. гос. ун-т. путей сообщения (МИИТ), 2001. 384 с.
2. Каюмов Р. А., Сулейманов А. М., Мухамедова И. З., Мангушева А. Р., Шакирова А. М. Методы оценки прочности и долговечности пленочно-тканевых композиционных материалов. Казань : КГАСУ, 2015. 160 с.
3. Рахимов Р. З., Алтыкис М. Г. Долговечность строительных материалов. Казань : КГАСУ, 2005. 118 с.
4. Соломатов В. И., Селяев В. П., Соколова Ю. А. Химическое сопротивление материалов. М. : РААСН, 2001. 284 с.
5. Каюмов Р. А., Ибрагимова А. А. Об оценке предельной нагрузки железобетонной стенки, подверженной одностороннему воздействию влаги // Известия КГАСУ. 2017. № 3 (41). С. 98–108.
6. Фаликман В. Р., Степанова В. Ф. Современные проблемы обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Вестник НИЦ строительство. 2014. № 9 (32). С. 87–98.
7. Васильев А. А. Оценка прочности бетона и её прогнозирование для бетонных и железобетонных конструкций. Гомель : БелГУТ, 2005. С. 304–356.
8. Васильев А. А. Методика оценки и прогнозирования состояния длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций. Гомель : БелГУТ, 2006. С. 188–193.
9. Ветров С. Н., Яковлев С. В. Специфика обследования состояния железобетонных конструкций в условиях агрессивного воздействия воды // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 7 (17). С. 35–40.
10. Карпенко Н. И., Карпенко С. Н., Ямаковский В. Н., Ерофеев В. Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 1. С. 91–102.
11. 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. 2012. № 1. С. 4–11.
12. Kosmatka S. H., Kerkoff B, Hooton R. Design and control of Concrete Mixtures. The Guide to Application. Ottawa : Methods and Materials, Eight Canadian Edition. Cement Association of Canada, 2011. P. 35–68.
13. Selyaev V. P., Selyaev P. V., Sorokin E. V., Udina O. A., Tsganov V. V. Crack resistance of reinforced concrete structures with epoxy coating. Verlag Waldkraiburg : Munich publishing office Vela, 2013. P. 167–176.
14. Selyaev V. P., Selyaev P. V., Sorokin E. V. Physical bases of materials strength with the structure of conglomerate type. Westwood : Publishing office Accent Graphics communications, 2012. P. 523–531.

**Kayumov Rashit Abdulkhakovich**

doctor of physical and mathematical sciences, professor

E-mail: [kayumov@rambler.ru](mailto:kayumov@rambler.ru)**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Kashafdinova Alsu Faritovna**

engineer

E-mail: [kashafdinovaalsu@gmail.com](mailto:kashafdinovaalsu@gmail.com)**LTD «Vostok-C»**

The organization address: 420111, Russia, Kazan, Moskovskaya st., 27



## Method of describing the degradation process of concrete constructions under the influence of salt corrosion

### Abstract

*Problem statement.* Nowadays the actual problem is the development of theoretical methods of rating the durability of building constructions operating under the co-action of force factors and aggressive environments. The purpose of the research is to create the mathematical model describing the degradation process of concrete under the influence of salt solution allowing calculating the load capacity at different times and giving an estimate of the durability of the construction.

*Result.* The task of diffusion of salt solution into concrete and a task of crystallization of this salt in the pores of concrete are considered. An example of processing of the result of the experiment to determine the liquid diffusion coefficient in concrete is given. The solution is carried out at finite differences of time and coordinates. The ratio is proposed in the form of a differential equation for determining the salt crystallization speed in pores of concrete and its solution. Shows the results of experiments to determine the durability of the samples exposed by the effect of salt solution for three and six months. An estimation of the effect of the crystallized salt weight in the pores of material on strength properties is presented. The dependence of concrete durability on the concentration of salt in it is approximated by the function that makes it possible to determine the value of durability at different points of the wall at a certain point of time.

*Conclusions.* The significance of the results for the construction industry is the ability predict fall of load capacity of the concrete wall over time affected by the salt solution.

**Keywords:** concrete, durability, corrosion, degradation, salt.

### References

1. Solomatov V. I., Selyaev V. P., Sokolova Y. U. A. Chemical resistance of materials. M. : Ros. akad. arkhitektury i stroit. nauk; Mordov. gos. un-t; Mosk. gos. un-t. putey soobshcheniya (MIIT), 2001. 384 p.
2. Kayumov R. A., Suleymanov A. M., Mukhamedova I. Z., Mangusheva A. R., Shakirova A. M. Methods of rating the strength and durability of membrane-cloth composite materials. Kazan : KGASU. 2015. 160 p.
3. Rakhimov R. Z., Altykis M. G. Durability of building materials. Kazan : KGASU, 2005. 118 p.
4. Solomonov V. I., Selyaev V. P., Sokolova Yu. A. The chemical resistance of materials. M. : RAASN, 2001. 284 p.
5. Kayumov R. A., Ibragimova A. A. Report on the evaluation of the ultimate load of reinforced concrete columns under the influence one-side effect of moisture // Izvestiya KGASU. 2017. № 3 (41). P. 98–108.
6. Falikman V. R., Stepanova V. F. Modern problems of ensuring the durability of reinforced concrete structures // Vestnik NITS stroitel'stvo. 2014. № 9 (32). P. 87–98.
7. Vasil'ev A. A. Estimation of strength of concrete and its prediction for concrete and reinforced concrete structures. Gomel : BelGUT, 2005. P. 304–356.
8. Vasil'ev A. A. Method for estimating and forecasting the state of long-lived reinforced concrete constructions. Gomel : BelGUT, 2006. P. 188–193.
9. Vetrov S. N., Yakovlev S. V. Specificity of the survey of the condition of reinforced concrete constructions // Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal. 2010. № 7 (17). P. 35–40.
10. Karpenko N. I., Karpenko S. N., Yarmakovskiy V. N., Erofeev V. T. About modern methods for ensuring the durability of reinforced concrete // Academia. Arkhitektura I stroitel'stvo. 2015. № 1. P. 91–102.
11. Selyaev V. P., Oshkina L. M., Selyaev P. V., Sorokin E. V. Investigation of chemical resistance of cement concretes with sulfate corrosion control // Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo. 2012. № 1. P. 4–11.
12. Kosmatka S. H., Kerkoff B, Hooton R. Design and control of Concrete Mixtures. The Guide to Application. Ottawa : Methods and Materials, Eight Canadian Edition. Cement Association of Canada, 2011. P. 35–68.
13. Selyaev V. P., Selyaev P. V., Sorokin E. V., Udina O. A., Tsganov V. V. Crack resistance of reinforced concrete structures with epoxy coating. Verlag Waldkraiburg : Munich publishing office Vela, 2013. P. 167–176.
14. Selyaev V. P., Selyaev P. V., Sorokin E. V. Physical bases of materials strength with the structure of conglomerate type. Westwood : Publishing office Accent Graphics communications, 2012. P. 523–531.