

УДК 620.193.4

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ИЗ БЕТОНА**

**DEFINING RESOURCES SAFE OPERATION
OF BUILDINGS AND STRUCTURES FROM CONCRETE**

В.Е. РУМЯНЦЕВА, В.А. ХРУНОВ, М.Е. ШЕСТЕРКИН
V.E. RUMYANTSEVA, V.A. KHRUNOV, M.E. SHESTERKIN

(Ивановский государственный политехнический университет)
(Ivanovo State Polytechnic University)
E-mail: xem@ivgpu.com

В статье рассмотрены актуальные вопросы расчета и прогнозирования остаточного ресурса конструкций зданий (сооружений), подверженных коррозионным процессам. Проведено математическое моделирование массопереноса в процессах коррозии первого вида, возникающих в бетоне при воздействии на него вод с малой жесткостью, когда составные части цементного камня растворяются, вымываются и уносятся перемещающейся водной средой. Приведено решение задачи методом преобразований Лапласа. Получены выражения, позволяющие рассчитывать значение концентраций свободного гидроксида кальция по толщине конструкции в любой момент времени и его содержание в жидкой фазе, которые дают возможность расчета остаточного ресурса конструкций зданий (сооружений) после воздействия процессов коррозии вплоть до исчерпания их потребительской ценности, что в настоящее время является одной из злободневных задач в сфере обеспечения безопасной эксплуатации зданий и сооружений.

The article deals with current issues of calculation and prediction of residual life of structures of buildings (structures), subject to corrosion processes. The mathematical modeling of mass transfer of the first type of corrosion occurring in the concrete when exposed to water with a low hardness when the components of

the cement paste to dissolve, washed and entrained water moving medium. A solution of the problem by the method of Laplace transforms. Expressions possible to calculate the value of the concentration of free calcium hydroxide in thickness design at any time and its content in the liquid phase, which allow the calculation of residual life of structures of buildings (structures) after exposure to corrosion processes until the end of their use value, which is currently is one of the urgent tasks in ensuring the safe operation of buildings and structures.

Ключевые слова: безопасность, долговечность, остаточный ресурс, коррозия, цементный бетон, жидкая водная среда, диффузия, массоперенос, математическое моделирование.

Keywords: safety, durability, residual life, corrosion, cement concrete, the liquid aqueous medium, diffusion, mass transfer, mathematical modeling.

В современном промышленном, гражданском и транспортном строительстве бетон является основным материалом для возведения ответственных сооружений и конструкций. Область применения бетона и железобетона весьма обширна – от плотин гидростанций, несущих и ограждающих конструкций зданий до дорожных покрытий и железнодорожных шпал. Высокая прочность сооружений из железобетона и сравнительная простота работ предопределили широкую область его применения. Но воздействие агрессивных сред способно с течением времени ослаблять прочность бетона, повышая тем самым риски опасного обрушения строительных конструкций и возникновения техногенных аварий.

Известно немало случаев, когда из-за ошибок, допущенных при оценке запаса прочности конструкций, неудовлетворительной диагностики и не принятия своевременных мер по усилению сооружения, происходили крупные аварии с человеческими жертвами: катастрофы в московском аквапарке "Трансвааль" (2004 г.) и в рижском торговом центре "Максима" (2013 г.), обрушения крыш терминала E-2 в парижском аэропорту "Шарль де Голль" (2004 г.) и Басманного рынка в Москве (2006 г.).

Одна из возможных причин таких катастроф – коррозия бетона, которая может проявляться в виде частичного или полного разрушения одной или нескольких их составных частей в результате физическо-

го, химического, физико-химического или биологического воздействий коррозионной среды или внутренних процессов в бетоне.

Отсюда возникает настоятельная потребность в детальном изучении коррозионных явлений в бетоне и определении на этой основе характеристик, необходимых для прогноза долговечности и расчета остаточного ресурса конструкций зданий (сооружений).

Как известно, твердение бетона характеризуется химическими реакциями гидратации алита и белита. В результате в твердеющем бетоне образуется "свободный гидроксид кальция", содержание которого достигает 10...15% и который может вымываться из конструкции под воздействием окружающей среды (дождевых вод, конденсатов, вод оборотного водоснабжения и т.п.) [1]. Уменьшение содержания "свободного гидроксида кальция" в результате "вымывания" его из бетона жидкостью вызывает изменение фазового и термодинамического равновесия в системе, приводит к разложению основных составляющих цементного клинкера, таких как полугидрат сульфата кальция, гипс, трехкальциевый алюминат, алит, белит, гиллебрандит, ксонотлит, тоберморит, что в свою очередь приводит к необратимой потере прочностных свойств бетона.

Поэтому вопросы изучения кинетики и динамики массопереноса "свободного гидроксида кальция" в жидкую фазу по своей сути и есть вопросы прогнозирования долговечности бетонов.

В предыдущих публикациях [2...5] нами было показано, что массоперенос в системе "резервуар - жидкость" определяется краевой задачей массопроводности вида:

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 C(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad 0 \leq x \leq \delta. \quad (1)$$

Начальное условие:

$$C(x, \tau)|_{\tau=0} = C(x, 0) = C_0. \quad (2)$$

Граничные условия:

$$\frac{\partial C(0, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

$$k \frac{\partial C(\delta, \tau)}{\partial x} = \beta [C_p(\tau) - C(\delta, \tau)], \quad (4)$$

где $C(x, \tau)$ – концентрация "свободного гидроксида кальция" в бетоне в момент времени τ в произвольной точке с координатой x , в пересчете на CaO, кг CaO/кг бетона; $C_0(x)$ – концентрация "свободного гидроксида кальция" в бетоне в начальный момент времени в произвольной точке с координатой x , в пересчете на CaO, кг CaO/кг бетона; $C_p(x)$ – равновесная концентрация на поверхности твердого тела, кг CaO/кг бетона; k – коэффициент массопроводности в твердой фазе, м²/с; δ – толщина стенки конструкции, м; x – координата, м; τ – время, с; β – коэффициент массоотдачи в жидкой среде, м/с.

Отличительной особенностью математической модели (1)...(4) от классической теории массопереноса является не постоянство величины равновесной концентрации на поверхности твердого тела C_p , а ее зависимость от концентрации компонента в жидкой фазе $C_ж$. Простейшей зависимостью при равенстве скоростей в прямом (адсорбция) и обратном (десорбция) направлениях является закон Генри:

$$C_p(\tau) = m C_ж(\tau), \quad (5)$$

где m – константа Генри, кг жидкости /кг бетона.

На рис. 1 кривая 1 показывает реальную кривую равновесия для системы "бетон - вода", кривая 2 иллюстрирует закон Генри. Зона I – зона действия закона Генри (зона малых концентраций); зона II – зона, в которой закон Генри перестает действовать. Очевидно, что в замкнутой системе, чем дальше идет процесс, и жидкость все более насыщается переносимым компонентом, интенсивность массопереноса все более снижается, а расхождение между линиями все более вырастает. Следовательно, будет увеличиваться и ошибка расчетов, основанных на законе Генри.

Согласно закону сохранения масс поток массы вещества, выходящего с поверхности бетона, должен быть равен количеству вещества, прибывающему в жидкую фазу:

$$-S \rho_b k \frac{\partial C(\delta, \tau)}{\partial x} = V_ж \rho_ж \frac{\partial C_ж(\tau)}{\partial \tau}. \quad (6)$$

Здесь: левая часть – количество переносимого компонента через внутреннюю поверхность резервуара S , м²; правая часть – приращение массы компонента в объеме $V_ж$ резервуара, м³; ρ_b , $\rho_ж$ – плотности бетона и жидкости соответственно, кг/м³.

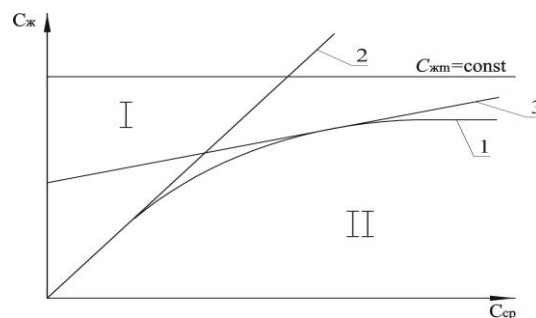


Рис. 1

Дифференциальное уравнение (6) представляет собой материальный баланс переносимого компонента, так как его левая часть отражает значение плотности потока массы вещества, поступающего из внутренних слоев бетона к межфазной границе, а правая часть показывает количество вещества, поступающего в результате массопереноса в объем жидкости. Причем, знак "-" в левой части равенства указывает на

уменьшение концентрации "свободного гидроксида кальция" в бетоне.

Впервые идея о возможности совместного рассмотрения массопереноса в замкнутой системе "твердое - жидкость" была высказана при исследовании процессов адсорбции профессором Ивановского химико-технологического института К.Н. Белоноговым в 60-х годах прошлого века и с его согласия опубликована профессором Львовского политехнического института Л.С. Аксельрудом в монографии [6].

$$Z(\bar{x}, Fo_m) = \frac{C_0 - C(x, \tau)}{C_0}, \quad \bar{x} = \frac{x}{\delta}, \quad Fo_m = \frac{k\tau}{\delta^2}, \quad Bi_m = \frac{\beta\delta}{k}, \quad Z_{\text{ж}}(Fo_m) = \frac{C_0 - mC_{\text{ж}}(\tau)}{C_0}. \quad (8)$$

Обозначим также:

$$K_m = \frac{mS\delta}{V_{\text{ж}}} \frac{\rho_{\text{б}}}{\rho_{\text{ж}}} = \frac{mG_{\text{б}}}{G_{\text{ж}}}, \quad (9)$$

где K_m – коэффициент, учитывающий характеристики фаз; $G_{\text{б}}$ – масса бетонного резервуара, кг; $G_{\text{ж}}$ – масса жидкости в резервуаре, кг.

С учетом этого краевая задача (1)...(4) преобразуется к виду задачи массопроводности при нелинейной изотерме сорбции:

$$\frac{\partial Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}^2}, \quad Fo_m > 0, \quad 0 \leq \bar{x} \leq 1. \quad (10)$$

Начальное условие:

$$Z(\bar{x}, 0) = 0. \quad (11)$$

Граничные условия:

$$\frac{\partial Z(0, Fo_m)}{\partial \bar{x}} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{1}{Bi_m} \frac{\partial Z(1, Fo_m)}{\partial \bar{x}} = [Z_p(Fo_m) - Z(1, Fo_m)]. \quad (13)$$

$$Z(\bar{x}, Fo_m) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \mu_n \cos(\mu_n \bar{x}) \psi(\mu_n, Bi_m, K_m) \times \int_0^1 Z_0(\xi) \cos(\mu_n \xi) d\xi \exp(-\mu_n^2 Fo_m), \quad (17)$$

$$\text{где } \psi(\mu_n, Bi_m, K_m) = \frac{(\mu_n^2 - Bi_m K_m) \cos \mu_n + Bi_m \mu_n \sin \mu_n}{\sin \mu_n [3\mu_n^2 + Bi_m (\mu_n^2 - K_m)] + \cos \mu_n \mu_n Bi_m [\mu_n^2 - (Bi_m K_m + 2)]}. \quad (18)$$

В данной статье этот подход адаптирован к расчетам коррозионного массопереноса для систем "ограждающая бетонная конструкция - жидкая среда".

Предположим, что равновесие в системе описывается линейной зависимостью:

$$C_p(\tau) = a + bC_{\text{ж}}(\tau). \quad (7)$$

Для упрощения понимания решения воспользуемся критериями подобия и введем безразмерные переменные вида:

В уравнении (13) $Z_p(Fo_m)$ есть то же самое, что и $Z_{\text{ж}}(Fo_m)$.

Тогда условие массообмена бетона и жидкости окончательно примет вид:

$$-\frac{\partial Z_{\text{ж}}(Fo_m)}{\partial Fo_m} = K_m \frac{\partial Z(1, Fo_m)}{\partial \bar{x}}. \quad (14)$$

При этом начальное условие (2) меняется на неравномерное распределенное:

$$C(x, \tau)|_{\tau=0} = C(x), \quad (15)$$

или в безразмерном виде:

$$Z_0(\bar{x}) = \frac{C_0 - C(x)}{C_0}. \quad (16)$$

Решение системы (10)...(13) выполнялось методом преобразования Лапласа, то есть исходная система уравнений отображалась в область комплексных чисел, в которых было получено решение системы, а затем был произведен перевод решения в область оригиналов, и имеет вид:

Формула (18) позволяет рассчитывать динамику массопереноса в бетонной конструкции и изменение полей концентраций переносимого компонента.

При этом характеристическое уравнение для поиска корней μ_n имеет вид:

$$\operatorname{tg} \mu_n = \frac{\mu_n \operatorname{Bi}_m}{\mu_n^2 - \operatorname{Bi}_m K_m}. \quad (19)$$

Среднее по толщине конструкции значение концентрации определяется интегрированием:

$$Z_{cp}(Fo_m) = \int_0^1 Z(\xi Fo_m) d\xi. \quad (20)$$

Для того чтобы получить уравнение кинетики изменения содержания "свободного гидроксида кальция" в объеме жидкости, выразим физическое значение равновесной концентрации:

$$C_p(\tau) = C_0 [1 - Z_p(Fo_m)]. \quad (21)$$

Равновесие в рассматриваемой системе "бетонная конструкция - жидкая среда", как и было отмечено ранее, определяется линейной зависимостью (7), из которой мы выражаем значение концентрации переносимого компонента в жидкой фазе:

$$C_{ж}(\tau) = \frac{1}{b} [C_p(\tau) - a]. \quad (22)$$

Подставляем (22) в (21):

$$C_{ж}(\tau) = \frac{1}{b} \{C_0 [1 - Z_p(Fo_m)] - a\}. \quad (23)$$

Для того чтобы привести значение концентрации в жидкой фазе к безразмерным величинам, возвратимся к вопросу о равновесии в системе "твердое - жидкость". На рис. 1 нанесем асимптотическую линию $C_{жм} = \text{const}$, параллельную оси абсцисс. По своему физическому смыслу $C_{жм}$ характеризует предельное (максимальное) значение растворимости гидроксида каль-

ция в жидкости при данных условиях взаимодействия фаз.

Поделим левую и правую части уравнения (23) на $C_{жм}$:

$$\frac{C_{ж}(\tau)}{C_{жм}} = \frac{C_0}{bC_{жм}} [1 - Z_p(Fo_m)] - \frac{a}{bC_{жм}}. \quad (24)$$

Все слагаемые в выражении (24) имеют безразмерный вид. Поэтому для упрощения расчетов можно записать:

$$Z_{ж}(Fo_m) = K_A [1 - Z_p(Fo_m)] - K_B, \quad (25)$$

где $Z_{ж}(Fo_m) = \frac{C_{ж}(\tau)}{C_{жм}}$, $K_A = \frac{C_0}{bC_{жм}}$,

$$K_B = \frac{a}{bC_{жм}}.$$

Полученные выражения позволяют рассчитывать значение концентраций переносимого компонента ("свободного гидроксида кальция") по толщине конструкции в любой момент времени и его содержание в жидкой фазе и прогнозировать продолжительность процессов коррозии.

ВЫВОДЫ

1. Разработана физико-математическая модель процесса диффузии переносимого компонента ("свободного гидроксида кальция") в твердой фазе бетона с учетом воздействия жидкой нейтральной среды на уровне феноменологических уравнений, базирующаяся на записи краевой задачи нестационарной массопроводности.

2. Получены аналитические решения задачи массопереноса в процессах коррозии бетона первого вида для системы "твердое тело - жидкость" в условиях ограниченного объема жидкой фазы, позволяющие рассчитывать концентрации "свободного гидроксида кальция" в твердой и жидкой фазах. Представленные выражения дают возможность расчета остаточного ресурса конструкций зданий (сооружений) после воздействия процессов коррозии вплоть до исчерпания их потребительной ценности, что в настоящее вре-

мя является одной из злободневных задач в сфере обеспечения безопасной эксплуатации зданий и сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федосов С.В., Базанов С.М. Сульфатная коррозия бетона. – М.: АСВ, 2003.
2. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Федосова Н.Л., Смелцов В.Л. Моделирование массопереноса в процессах жидкостной коррозии бетона первого вида // Строительные материалы. – 2005, №7. С. 60...62.
3. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Хрунов В.А., Аксаковская Л.Н. Моделирование массопереноса в процессах коррозии бетонов первого вида (малые значения числа Фурье) // Строительные материалы. – 2007, №5. С. 70...71.
4. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Хрунов В.А., Шестеркин М.Е. Вопросы прогнозирования долговечности строительных конструкций // Строительство и реконструкция. – 2011, №5 (37). С.63...69.
5. Каюмов Р.А., Федосов С.В., Румянцева В.Е., Хрунов В.А., Манохина Ю.В., Красильников И.В. Математическое моделирование коррозионного массопереноса гетерогенной системы "жидкая агрессивная среда - цементный бетон". Частные случаи решения // Изв. КГАСУ. – 2013, №4(26). С.343...348.
6. Аксельруд Г.А., Лысянский В.М. Экстрагирование (система твердое тело - жидкость). – М.: Химия, 1974.

REFERENCES

1. Fedosov S.V., Bazanov S.M. Sul'fatnaja korrozija betona. – M.: ASV, 2003.
2. Fedosov S.V., Rumjanceva V.E., Fedosova N.L., Smel'cov V.L. Modelirovanie massoperenosa v processah zhidkostnoj korrozii betona pervogo vida // Stroitel'nye materialy. – 2005, №7. S. 60...62.
3. Fedosov S.V., Rumjanceva V.E., Hrunov V.A., Aksakovskaja L.N. Modelirovanie massoperenosa v processah korrozii betonov pervogo vida (malye znachenija chisla Fur'e) // Stroitel'nye materialy. – 2007, №5. S. 70...71.
4. Fedosov S.V., Rumjanceva V.E., Hrunov V.A., Shesterkin M.E. Voprosy prognozirovanija dolgovechnosti stroitel'nyh konstrukcij // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. – 2011, №5 (37). S.63...69.
5. Kajumov R.A., Fedosov S.V., Rumjanceva V.E., Hrunov V.A., Manohina Ju.V., Krasil'nikov I.V. Matematicheskoe modelirovanie korrozionnogo massoperenosa geterogennoj sistemy "zhidkaja agressivnaja sreda - cementnyj beton". Chastnye sluchai reshenija // Izv. KGASU. – 2013, №4(26). S.343...348.
6. Aksel'rud G.A., Lysjanskij V.M. Jekstragirovanie (sistema tverdoe telo - zhidkost'). – M.: Himija, 1974.

Рекомендована кафедрой химии, экологии и микробиологии. Поступила 09.07.15.