

УДК 725.34:691.327:620.193

**С. В. СОРОКАНИЧ**Луганский национальный аграрный университет, Луганский национальный университет имени Владимира  
Дала**КОРРОЗИЯ БЕТОНА СООРУЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ФИЛЬТРАЦИОННОГО  
ВЛАГОПЕРЕНОСА**

**Аннотация.** Построена математическая модель процессов коррозии бетона морских сооружений, основанная на рассмотрении всей совокупности физических и химических процессов в поровом пространстве бетона. Модель учитывает химические процессы, в результате которых происходит накопление в бетоне сульфатов, а также образование пленок. На основе химических и физических процессов решена задача Стефана с подвижными границами, которая сводится к двумерной задаче связывания агрессивного вещества в жидкой фазе на подвижной границе. Предлагаемая математическая модель может быть использована для усовершенствования методики проведения экспериментальных исследований, а в дальнейшем для разработки инженерных методик прогнозирования долговечности сооружений, эксплуатируемых в морской воде.

**Ключевые слова:** бетон, коррозия, математическая модель, агрессивная среда.

**ВВЕДЕНИЕ**

Исследованию процессов коррозии бетонов в морской воде посвящены многочисленные работы, анализ которых приведен в [1, 2, 6, 10]. Они позволили установить основные химические реакции, протекающие в бетоне в зависимости от химического состава и температуры воды, вида вяжущего и добавок, использованных при приготовлении бетона и т. п. Вместе с тем до последнего времени отсутствовали научно-обоснованные методики расчета долговечности и, соответственно, надежности сооружений. Известно, что наиболее интенсивно процессы коррозии протекают в зоне капиллярного подсоса. В частности, наличие направленного влагопереноса за счет процессов испарения влаги с открытой бетонной поверхности приводит к существенному изменению кинетики процессов коррозии [5]. Ранее были исследованы процессы коррозии бетона в неполностью водонасыщенном бетоне в случае направленного одномерного процесса влагопереноса [4, 6]. В настоящей работе указанное решение распространено на случай испарения влаги с боковой поверхности, т. е. случай плоской задачи. Кроме того, вводятся дополнительные упрощения и допущения, позволяющие получить относительно простые аналитические решения. Согласно указанной схеме при массопереносе агрессивного вещества вокруг капилляров в поровом пространстве бетона образуется расширяющаяся во времени граница химического (фазового) превращения.

**Целью работы** является разработка математической модели коррозии бетона, учитывающей влияние физических и химических процессов в поровом пространстве бетона.

**Химические особенности процессов коррозии**

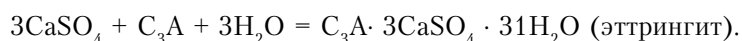
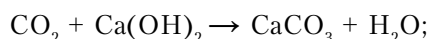
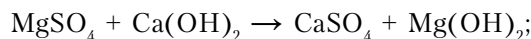
В реальных условиях морские бетонные сооружения подвергаются воздействию жидких агрессивных сред, химический состав которых согласно данным [1] представлен в табл.

**Таблица** – Химический состав морской воды Черного моря

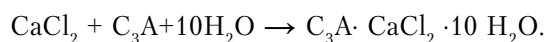
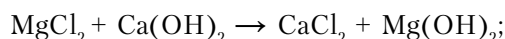
Общая соленость г/л	Содержание ионов г/л					
	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
18,0	9,9	1,4	0,04	5,5	0,67	0,22

© С. В. Сороканич, 2017

Наиболее четкое представление о механизме разрушения бетонов в морской воде дано в работах М. Регура [1]. Коррозионное действие морской воды определяет главным образом  $MgSO_4$ , который реагирует с гидроксидом кальция с образованием гипса и гидроксида магния [1]. Образовавшийся гипс, реагируя с выделяющимся при гидролизе силикатов кальция гидроксидом кальция, образует гидросульфатоалюминат кальция. Одновременно протекают процессы образования гидрохлоралюмината кальция и возможно образование таумасита.



Соединения  $Mg(OH)_2$  и  $CaCO_3$  образуют пленку на поверхности бетона и уплотняют поры [1]. Эттрингит и частично  $CaSO_4$  выделяются с увеличением объема и вызывают расширение. Кроме этих основных реакций, протекает взаимодействие хлоридов с гидроксидом кальция  $C_3A$ :



Указанные уравнения реакций представляют лишь суммарную схему процессов. Выполнявшиеся многократно химические анализы затвердевшего цементного камня подтвердили накопление в бетоне магния и сульфатов, а в последнее время и образование пленок  $Mg(OH)_2$  и  $CaCO_3$  [1].

#### *Физические особенности процессов коррозии*

Одним из основных факторов долговечности бетонов является безнапорная фильтрация, которая проявляется в эксплуатируемых длинномерных конструкциях мостов, тоннелей и других гидротехнических сооружений. В условиях направленного (фильтрационного) влагопереноса поровая структура бетона рассматривается в качестве капиллярно-пористой среды.

Учитывается, что:

- испарение происходит с боковой поверхности;
- бетон по структуре порового пространства является капиллярно-пористым телом;
- боковая граница принимается проницаемой для влаги и непроницаемой для солей;
- на внутренней поверхности порового пространства бетона образуется и перемещается подвижный фронт химических превращений (ФХП);
- скорость капиллярного влагопереноса больше скорости испарения, т. е. испарение происходит только с поверхности. Указанное естественно, если учесть, что при периодических волновых движениях происходит замачивание поверхности бетона;
- принимается, что скорость фильтрационных потоков в направлении осей  $x$  и  $y$  постоянна и равна усредненному значению.

Принимается, что структура порового пространства бетона в данном случае характеризуется как капиллярно-пористое тело. Геометрическое описание структуры: она приводится к монокапиллярной со сквозными капиллярами радиуса  $r_0$ , расположенными в шахматном порядке на расстоянии  $2R_0$ , друг от друга. Таким образом, можно выделить структурный элемент радиуса  $R_0$ , с изолированной боковой поверхностью, в центре которого располагается сквозной капилляр радиуса  $r_0$ . Кроме того, к капилляру примыкают микрокапилляры, по которым осуществляется массоперенос преимущественно в радиальном направлении.

При математическом формулировании задачи соответствующая задача типа Стефана с подвижными границами сводится к соответствующей одномерной задаче с функцией стока, характеризующей скорость связывания агрессивного вещества в химических реакциях. Для рассматриваемого случая двухмерной задачи связывание агрессивного вещества в жидкой фазе происходит на подвижной границе в направлении осей  $x$  и  $y$ . Схема изучаемого процесса коррозии представлена на рис. 1.

Обоснование указанной методики и алгоритма численного расчета дано в [3]. В данном случае функция стока имеет вид:

$$Q(t) = q_{1x}(t) + q_{2y}(t); \quad Q(t) = \sum_{i=1}^2 q_{in}(t), \quad (1)$$

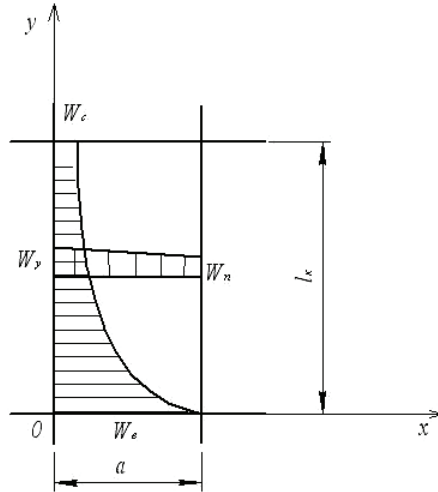


Рисунок 1 – Распределение влаги в элементе по двум направлениям.

где

$$q_{1x}(t) = \frac{2D\bar{C}_x\bar{w}_x}{(R_1t + r_0^2)}; R_1 = \frac{2D\bar{C}_x\bar{w}_x}{\mu m_0}; q_{2y}(t) = \frac{2D\bar{C}_y\bar{w}_y}{(R_2t + r_0^2)}; R_2 = \frac{2D\bar{C}_y\bar{w}_y}{\mu m_0}$$

Здесь обозначено:  $q_{1x}(t)$ ,  $q_{2y}(t)$  – функции стока в направлении осей  $x$  и  $y$ ;  $D$  – коэффициент диффузии раствора агрессивного вещества;  $\bar{C}_x$ ,  $\bar{C}_y$ ,  $\bar{w}_x$ ,  $\bar{w}_y$  – соответственно усредненные значения концентраций и влагосодержания в точках с координатами  $x$  и  $y$ ;  $n$  – координатная ось;  $m_0$  – концентрация нейтрализуемого компонента;  $\mu$  – стехиометрический коэффициент.

С учетом сделанных допущений исходное уравнение массопереноса агрессивной жидкости имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) - V_0 \frac{\partial C}{\partial x} - V_1 \frac{\partial C}{\partial y} - Q(t) = 0. \quad (2)$$

Краевые условия записываются в виде:

$$y = 0, C = C_n, \quad (3)$$

$$y = l_k, C = C_e, \quad (4)$$

$$x = 0, \frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad (5)$$

$$x = 0, D \frac{\partial C}{\partial x} + V_0 C = 0, \quad (6)$$

$$t = 0, C = C_0. \quad (7)$$

Для данной задачи получено соответствующее математическое решение [8]. Для установления адекватности модели проведены экспериментальные исследования образцов бетона в жидких агрессивных средах (рис. 2, 3) [9]. Результаты исследований подтвердили кинетику накопления продуктов коррозии в поровом пространстве бетона.

## ВЫВОДЫ

Разработанная математическая модель процессов коррозии бетонов в морской воде учитывает влияние физических и химических процессов на кинетику процессов коррозии и может быть использована для разработки инженерных методик прогнозирования долговечности сооружений, эксплуатируемых в агрессивной среде.

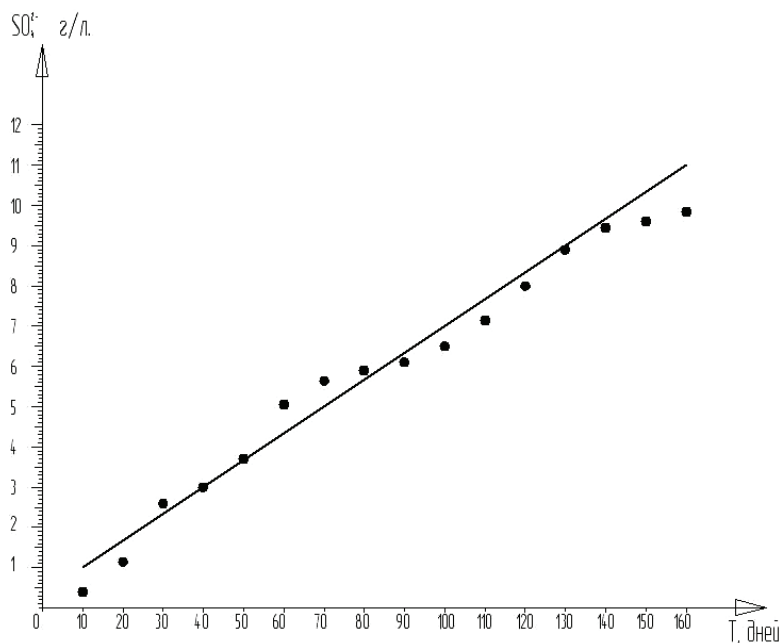


Рисунок 2 – Суммарное накопление сульфатов в порах бетона (агрессивная среда – морская вода).

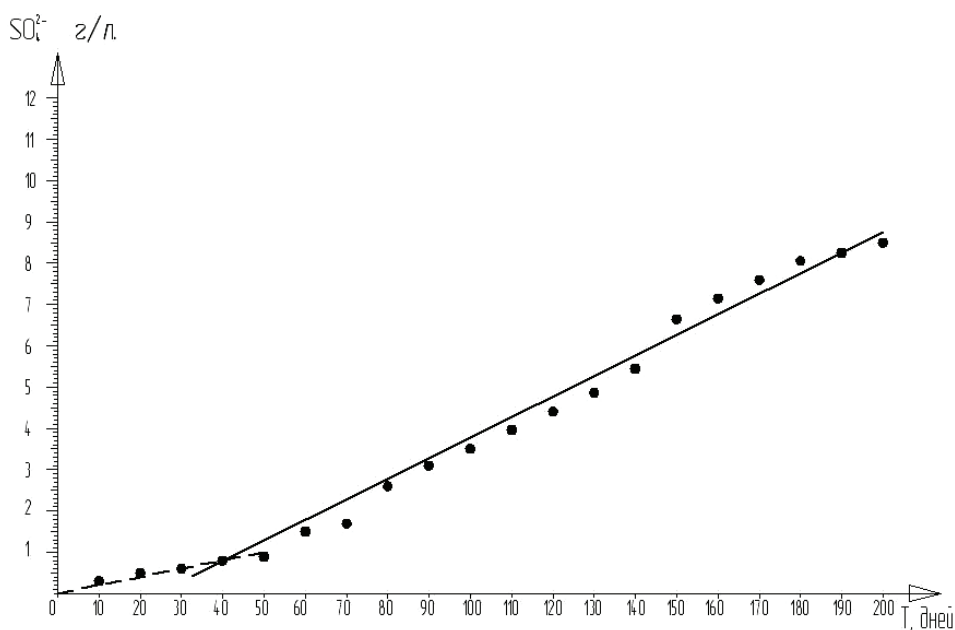


Рисунок 3 – Суммарное накопление сульфатов в порах бетона (агрессивная среда – раствор сульфата натрия, пунктирной показано водонасыщение).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долговечность железобетона в агрессивных средах [Текст] / С. Н. Алексеев, Ф. М. Иванов, С. Модры, П. Шисль. – М. : Стройиздат, 1990. – 316 с.
2. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты [Текст] / В. М. Москвин, Ф. М. Иванов, С. Н. Алексеев, Е. А. Гусев. – М. : СИ, 1980. – 536 с.
3. Физико-математическое моделирование процессов коррозии III вида с учетом влагопереноса [Текст] / А. С. Файву-сович, В. А. Рязанова, Г. Г. Бурцев, Т. А. Хохленко // Современные проблемы строительства : Ежегод. науч.-техн. сб. Т. 1 / ред.: Ю. К. Пельх; Укр. гос. строит. корпорация «Укрстрой», Гос. проект. и науч.-исследоват. ин-т «Донец. промстройниипроект». – Донецк : Лебедь, 2002. – С. 208–218.

4. Рязанова, В. А. Теоретические основы процессов сульфатной коррозии бетонных конструкций с испаряющей поверхностью [Текст] / В. А. Рязанова // Збірник наукових праць ЛНАУ. Серія : Технічні науки. – Луганськ : Видавництво ЛНАУ, 2007. – № 71(94). – С. 197–207.
5. Файвусович, А. С. Влияние влагопереноса на кинетику процесса коррозии [Текст] / А. С. Файвусович, В. А. Рязанова, Т. А. Хохленко // Будівельні конструкції. Сучасні проблеми бетону та його технологій. – К., 2002. – Вип. № 56. – С. 424–431.
6. Штарк, И. Долговечность бетона [Текст] / И. Штарк, Б. Вихт ; [пер. с нем. под рук. П. В. Кривенко]. – Киев : Оранта, 2004. – 301 с.
7. Лыков, А. В. Явление переноса в капиллярно-пористых телах [Текст] / А. В. Лыков. – М. : Гостехтеориздат, 1954. – 298 с.
8. Рябичева, Л. А. Коррозия бетона сооружений, эксплуатирующихся в агрессивной среде в зоне капиллярного подсоса [Текст] / Л. А. Рябичева, С. В. Сороканич, И. К. Максюк // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении : сб. науч. трудов. – Луганск, 2016. – Вып. № 2(17). – С. 172–185.
9. Сороканич, С. В. Коррозия бетона сооружений эксплуатирующихся в морской воде [Текст] / С. В. Сороканич, В. А. Беляева // Науковий вісник ЛНАУ. Серія: Технічні науки. – Луганськ : ЛНАУ, 2009. – № 3. – С. 305–308.
10. A rational model to predict the service life of rc structures in a marine environment [Текст] / K. Yokozeki, K. Motohashi, K. Okada, T. Tsutumi // SP-170: Fourth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete. Volume One / Editor: V. M. Malhotra. – Detroit : Farmington Hills, Mich. ; American Concrete Institute, 1997. – P. 777–799.

Получено 07.04.2017

### С. В. СОРОКАНИЧ КОРОЗИЯ БЕТОНУ СПОРУД З УРАХУВАННЯМ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО ВОЛОГОПЕРЕНОСУ

Луганський національний аграрний університет, Луганський національний університет імені Володимира Даля

**Анотація.** Побудована математична модель процесів корозії бетону морських споруд, заснована на розгляді всієї сукупності фізичних і хімічних процесів в пористому просторі бетону. Модель враховує хімічні процеси, в результаті яких відбувається накопичення в бетоні сульфатів, а також утворення плівок. На основі хімічних і фізичних процесів розв'язана задача Стефана з рухомими границями, яка зводиться до двовимірної задачі зв'язування агресивної речовини в рідкій фазі на рухомій границі. Запропонована математична модель може бути використана для вдосконалення методики проведення експериментальних досліджень, а в подальшому для розробки інженерних методик прогнозування довговічності споруд, експлуатованих в морській воді.

**Ключові слова:** бетон, корозія, математична модель, агресивне середовище.

### STANISLAV SOROKANICH CORROSION OF CONCRETE STRUCTURES WITH CONSIDERATION OF THE FILTRATION MOISTURE TRANSFER

Lugansk National Agrarian University, Vladimir Dahl Lugansk National University

**Abstract.** It has been made a mathematical model of the processes of corrosion of concrete marine structures based on consideration of the totality of the physical and chemical processes in the pore space of concrete. The model takes into account chemical processes that result in the accumulation in the concrete of sulfate and the formation of the films. On the basis of chemical and physical processes it has been solved the Stefan problem with moving boundary, which is reduced to the two-dimensional problem of the binding of aggressive substances in the liquid phase at the moving boundary. The proposed mathematical model can be used to improve the methods of conducting experimental studies, and further engineering methods of prediction of durability of structures operating in sea water.

**Key words:** concrete, corrosion, mathematical model, aggressive environment.

**Сороканич Станислав Васильевич** – ассистент кафедры технологии и организации строительного производства Луганского национального аграрного университета; старший преподаватель кафедры материаловедения и строительства Луганского национального университета им. В. Даля. Научные интересы: разработка инженерных методик прогнозирования долговечности сооружений, эксплуатируемых в агрессивной среде, и повышение их коррозионной стойкости.

**Сороканич Станіслав Васильович** – асистент кафедри технології та організації будівельного виробництва Луганського національного аграрного університету; старший викладач кафедри матеріалознавства і будівництва Луганського національного університету ім. В. Даля. Наукові інтереси: розробка інженерних методик прогнозування довговічності споруд, що експлуатуються в агресивному середовищі, і підвищення їх корозійної стійкості.

**Sorokanich Stanislav** – assistant, Technology and Organization of Construction Production Department, Lugansk National Agrarian University; senior lecturer, Materials Science and the Construction Department, Vladimir Dahl Lugansk National University. Scientific interests: development of engineering methods of prediction of durability of structures operated in aggressive environments, and enhancing their corrosion resistance.