

**С.П. Осипов, Ф.Ф. Кириллов, И.И. Подшивалов**  
(Томский государственный архитектурно-строительный университет;  
e-mail: osip1809@rambler.ru)

## **ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЗАЩИТНОГО СЛОЯ БЕТОНА СТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЕМКОСТЕЙ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ОПАСНЫХ ОТХОДОВ**

*Исследовано влияние коррозионного поражения стальных цилиндрических ёмкостей на развитие напряженно-деформированного состояния в защитном слое бетона. Получено приближенное аналитическое выражение для оценки долговечности защитного слоя бетона стальной цилиндрической ёмкости, пораженной коррозией.*

*Ключевые слова: защитный слой бетона, долговечность, стальные ёмкости, коррозия.*

**S.P. Osipov, F.F. Kirillov, I.I. Podshivalov**

## **ESTIMATION OF LIFE DURATION OF A CONCRETE COVER OF STEEL CYLINDRICAL TANKS FOR STORAGE OF A HAZARDOUS WASTE**

*The effect of corrosion damage of steel cylindrical tanks on the development of mode of deformation in the concrete cover explored. An approximated analytical expression for assessing the life duration of the concrete cover of corrosion damaged of steel cylindrical tanks is obtained.*

*Key words: concrete cover, life duration, steel tanks, corrosion.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 21 октября 2010 г.

Для хранения опасных отходов используют стальные подземные и наземные ёмкости, защищенные от окружающей среды слоем бетона [1]. С течением времени происходит перенос влаги, слабых растворов кислот из внешней среды через защитный слой бетона к поверхности стальной ёмкости. В результате этого поверхность ёмкости начинает корродировать. Коррозионные процессы стальных включений приводят к непосредственному изменению структуры приповерхностного слоя этих включений и к физическим воздействиям, способным вызвать деформации в защитном слое бетона [2]. В литературе не в полной мере исследовано влияние коррозионного поражения стальных ёмкостей на возникновение и развитие напряженно-деформированного состояния защитного слоя бетона, формирование слоя разрушенного бетона и долговечность защитного слоя бетона.

На рис. 1 приведена геометрическая схема объекта, состоящего из стальной цилиндрической ёмкости толщиной  $h_0$ , равномерно защищенной слоем бетона. Радиус внешней поверхности стальной цилиндрической ёмкости –  $r_0$ , радиус объекта –  $R_0$ .

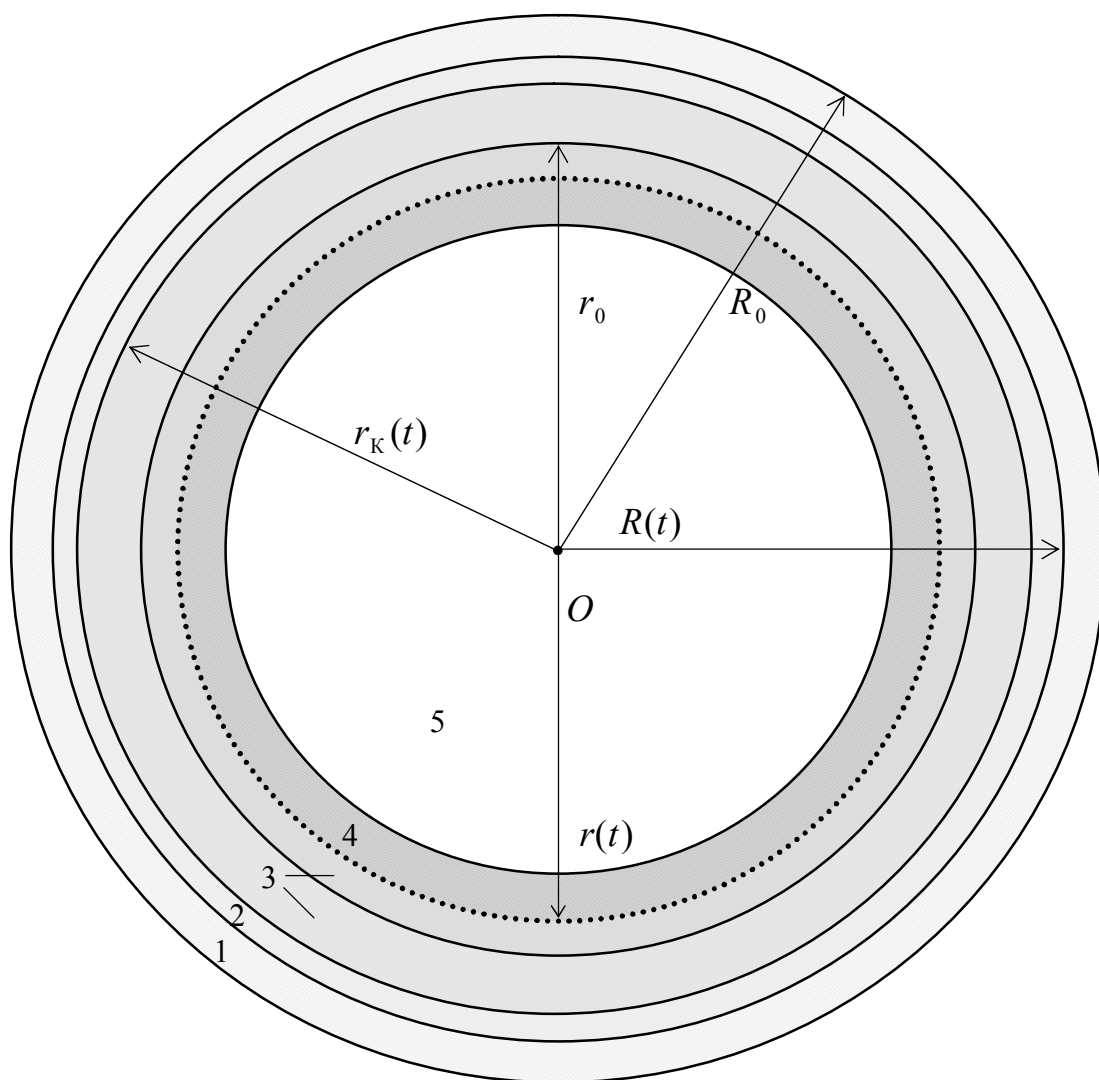


Рис. 1. Геометрическая схема коррозионного поражения стальной ёмкости, защищенной бетоном, и формирования разрушенного слоя бетона:  
 1 – бетон; 2 – слой разрушенного бетона; 3 – коррозионный слой;  
 4 – непораженная коррозией стенка ёмкости; 5 – ёмкость

Пусть объект функционирует в условиях агрессивного воздействия, которое обуславливается наличием влаги, растворов кислот, щелочей или солей. Предположим, что количество агрессивной жидкости, поступающей к единице площади границы стальной ёмкости, одинаково в любой момент времени. Исходя из постановки задачи, можно сделать вывод о том, что цилиндрическая симметрия для структурной модели объекта сохраняется во времени. Внешний поверхностный слой ёмкости испытает взаимодействие с агрессивной жидкостью. Внешняя поверхность нетрансформированной части стальной ёмкости будет окружена окислами или солями, для удобства будем называть получающийся поверхностный слой коррозионным слоем.

Можно считать материал коррозионного слоя как несжимаемым, так и сжимаемым. В первом случае плотность материала коррозионного слоя  $\rho_K$  равна  $\rho_0$ , а во втором случае может достигать предельного значения плотности

$\rho_0^*$  ( $\rho_0^* > \rho_0$ ), характерного для заданного материала. Плотность материала ёмкости  $\rho$  существенно больше, чем плотность материала коррозионного слоя  $\rho_K$ , если материал коррозионного слоя является сжимаемым, и тем более, если – несжимаемым. Напряженно-деформированное состояние в защитном слое бетона в данном случае обусловлено тем, что коррозионный слой по объему будет больше, чем объем поверхностного слоя ёмкости, испытавшего взаимодействие с агрессивной средой.

Цилиндрическая система координат связана с осью симметрии объекта. Все линейные размеры измеряются в единицах  $r_0$ . По истечении некоторого интервала времени  $t$  от начала эксплуатации изделия, в связи с коррозией, радиус внешней поверхности стальной ёмкости будет иметь значение  $r(t)$ ,  $r_0 - h_0 < r(t) < r_0$ . Функция  $r(t)$ , характеризующая временной сценарий развития коррозионного процесса, может иметь сложный вид, поэтому все дальнейшие преобразования будем проводить в общем виде. Выражение для вычисления расстояния от оси симметрии до внешней границы коррозионного слоя  $r_K(t)$  имеет вид:

$$r_K(t) = \sqrt{(1 - r(t)^2)\rho/\rho_K + r(t)^2}. \quad (1)$$

Напряженно-деформированное состояние бетонной среды вызывается не всем объемом коррозионного слоя, а только той его частью, которая заключена между внешней границей коррозионного слоя и внешней начальной границей стальной ёмкости. Анализ влияния расстояния между упомянутыми выше границами  $u_0(t)$  на напряженно-деформированное состояние бетона является основой дальнейших исследований. Выражение (1) позволяет определить временную зависимость  $u_0(t)$ :

$$u_0(t) = \sqrt{(1 - r(t)^2)\rho/\rho_K + r(t)^2} - 1. \quad (2)$$

В начальный момент времени  $t = 0$  перемещение  $u_0(t) = 0$ . На первом этапе нас интересует вопрос, с какого момента времени  $T$  начнется разрушение слоя бетона, граничащего с коррозионным слоем. В первом приближении можно рассмотреть критерий разрушения бетона, связанный с превышением по абсолютной величине некоторых значений радиальных и тангенциальных напряжений, характерных для заданного класса бетона [3]. Прочность бетона на сжатие  $\sigma_c$  много больше прочности бетона на растяжение  $\sigma_p$  [3], поэтому вначале достигаются предельные значения тангенциальных напряжений. Так как тангенциальные напряжения являются растягивающими, то разрушение бетона начинается с образования радиальных микротрещин.

Кроме момента времени  $T$ , связанного с началом возникновения зоны разрушения бетона, нас интересует  $R(t)$  – временная зависимость радиуса внешней границы слоя разрушенного бетона. Информация о временной зависимости  $R(t)$  необходима для определения моментов времени, характерных для жизненного цикла эксплуатации защищенных бетоном стальных ёмкостей.

Первый момент времени связан с возможностью ремонта или реконструкции рассматриваемых объектов для повышения их долговечности, а второй момент определяет время безусловного вывода объектов из эксплуатации.

Бетон можно считать упругой средой, поэтому достаточно рассмотреть поставленные выше задачи в рамках теории упругости [4] с учетом теории разрушения. Бетон, как упругая среда, характеризуется модулями упругости  $E$  (при растяжении и сжатии они одинаковы) и коэффициентом Пуассона  $\nu$ .

Будем считать, что разрушенный бетон не является упругой средой, не уплотняется, а при дальнейшем продолжении коррозии наружной поверхности стальной ёмкости происходит его перемещение.

Формулы для оценки радиальных напряжений  $\sigma_r$  и тангенциальных напряжений  $\sigma_\theta$  в точках бетонной среды с координатами  $x$  в первом приближении выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned}\sigma_r(x) &= \frac{Eu_0}{(1+\nu)(R_0^2+1-2\nu)} \left(1 - \frac{R_0^2}{x^2}\right), \\ \sigma_\theta(x) &= \frac{Eu_0}{(1+\nu)(R_0^2+1-2\nu)} \left(1 + \frac{R_0^2}{x^2}\right).\end{aligned}\tag{3}$$

Выражения (3) применимы для точек с координатами  $1 \leq x \leq R_0$ .

Из этих выражений следует, что значения радиальных напряжений для рассматриваемой задачи всегда меньше нуля –  $\sigma_r(x) < 0$ , радиальные напряжения являются сжимающими, а значения тангенциальных напряжений всегда больше нуля –  $\sigma_\theta(x) > 0$ , тангенциальные напряжения являются растягивающими.

Значения модулей упругости  $E$ , предельных напряжений на сжатие и растяжение бетона  $\sigma_c$  и  $\sigma_p$  могут быть взяты из [3] или измерены по стандартным методикам.

Из формул (2), (3) с учетом критерия, указанного выше, получим уравнение для вычисления момента времени  $T$ :

$$r(T) = \sqrt{\frac{[1 + (1 + \nu)(R_0^2 + 1 - 2\nu)\sigma_p / (E + ER_0^2)]^2 - \rho/\rho_k}{1 - \rho/\rho_k}}.\tag{4}$$

Для нахождения значения момента времени  $T$  с помощью соотношения (4) необходимо знать  $r(t)$  – временную зависимость радиуса наружной поверхности стальной ёмкости, которая может быть получена из экспериментальных исследований.

Рассмотрим простейший случай, в котором функция  $r(t)$  является линейной:

$$r(t) = 1 - kt,\tag{5}$$

где  $k$  – коэффициент, определяющий скорость коррозии.

Так как коррозия защищенных бетоном стальных ёмкостей является медленным процессом, то логично время измерять в годах и, соответственно, размерность коэффициента  $k - [r_0/\text{год}]$ .

Формула (5) достаточно хорошо описывает процесс коррозии стальной ёмкости для времени  $t$ , удаленного от начала коррозии. Легко получить точное решение уравнения (4) с учётом (5):

$$T = \frac{1}{k} \left( 1 - \sqrt{\frac{[1 + (1 + \nu)(R_0^2 + 1 - 2\nu)\sigma_p / (E + ER_0^2)]^2 - \rho/\rho_k}{1 - \rho/\rho_k}} \right). \quad (6)$$

Подчеркнем, что  $T$  – это время, начиная с которого в анализируемом объекте начинаются необратимые процессы, которые могут привести к необходимости вывода его из эксплуатации. Необратимые последствия обуславливаются поступлением агрессивной жидкости через защитный слой бетона и коррозионный слой к неповрежденному объему стальной ёмкости и продолжающимся процессом коррозии.

Перейдем ко второму этапу, то есть определению  $R(t)$  – временной зависимости радиуса внешней границы слоя разрушенного бетона. Будем пользоваться критерием разрушения бетона, описанным выше. Для оценки временной зависимости  $R(t)$  применим формулы (3). Очевидно, что для  $x > 1$  справедливо соотношение  $\sigma_\theta(x) > |\sigma_r(x)|$ . Поэтому искомая зависимость  $R(t)$  связана с фронтом распространения радиальных трещин:

$$R(t) = \sqrt{\frac{u_0(t)ER_0^2}{\sigma_p(1 + \nu)(R_0^2 + 1 - 2\nu) - u_0(t)E}}, \dots t > T. \quad (7)$$

Метод вычисления временной зависимости радиуса внешней границы слоя разрушенного бетона, основанный на выражениях (2)-(7), достаточно прост и учитывает параметры бетонной среды и функцию, описывающую развитие коррозии (для линейного описания – скорость коррозии).

Заметим, что выражения (5)-(7) позволяют легко проверить допустимость предположений о сжимаемости или несжимаемости материала коррозионного слоя. Для этого в указанные выражения вместо  $\rho$  подставляется  $\rho_0$  в случае, если материал коррозионного слоя является несжимаемым, или  $\rho_0^*$  в случае, если материал коррозионного слоя является сжимаемым. Полученные значения времен и радиусов внешних слоев разрушенного бетона можно использовать в качестве оценок "снизу" и оценок "сверху".

Кроме вышеуказанного, информация о радиусе внешнего слоя разрушенного бетона позволяет, исходя из принципа разумной достаточности, выбрать комплекс строительных машин и механизмов для реконструкции или безопасной разборки поврежденных зданий и сооружений.

**Пример расчёта.** Для иллюстрации возможностей использования предложенных математических соотношений для определения временных характеристик процесса формирования слоя разрушенного бетона, обусловленного коррозией наружной поверхности стальной ёмкости, приведем пример расчета.

Примем следующие начальные условия. Класс бетона – В40 [3]. Значения предельных напряжений на сжатие и растяжение бетона  $\sigma_c = 29 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_p = 2,1 \text{ МПа}$ . Модуль упругости бетона  $E = 36000 \text{ МПа}$ . Коэффициент Пуассона  $\nu = 0,2$ . Радиус стальной ёмкости  $r_0 = 5 \text{ м}$ . Радиус внешней поверхности защитного слоя бетона  $R = 5,5 \text{ м}$ . Коррозионный процесс развивается по закону (5) со скоростью  $0,00001 r_0/\text{год}$ . Материалом коррозионного слоя является оксид железа с плотностью  $\rho_0 = 5,1 \text{ г/см}^3$ . Значение предельной плотности оксида железа находится из предельного значения деформации, которое оценивается с помощью предельного значения прочности оксида железа и модуля упругости оксида железа. Искомое значение предельной плотности не превосходит  $5,15 \text{ г/см}^3$ .

Процесс разрушения в слое бетона, граничащем со стальной ёмкостью, начнется в момент времени  $T = 10,6$  года, если материал коррозионного слоя является несжимаемым, и в момент времени  $T = 10,9$  года, если материал коррозионного слоя является сжимаемым. По формуле (7) могут быть рассчитаны зависимости  $R(t)$ , характеризующие процесс формирования слоя разрушенного бетона, с учетом сжимаемости или несжимаемости материала коррозионного слоя.

По критическому значению минимального значения радиуса внешней поверхности слоя разрушенного бетона  $R_{\min}$ , задаваемого проектировщиком, можно принять решение на реконструкцию стальной ёмкости, защищенной слоем бетона, или вывод её из эксплуатации.

В качестве критического значения  $R_{\min}$  в ряде случаев целесообразно брать радиус внешней поверхности защитного слоя бетона. Для значения  $R_{\min} = R_0 = 5,5 \text{ м}$  и условий рассматриваемого примера получим, что разрушение на поверхности защитного слоя бетона может появиться уже через 11,7 года, если материал коррозионного слоя является несжимаемым, и через 12 лет, если материал коррозионного слоя является сжимаемым.

Проведенные исследования позволяют оценить влияние коррозионного поражения внешней поверхности стальной ёмкости на размер зоны разрушения защитного слоя бетона. Полученные приближенные аналитические выражения для вычисления основных временных характеристик исследуемого процесса могут быть использованы на стадии проектирования и эксплуатации стальных ёмкостей для хранения опасных отходов, защищенных слоем бетона, с целью увеличения долговечности емкостей и обеспечения экологической безопасности. Разработанная математическая модель процесса разрушения защитного слоя бетона может быть легко скорректирована с учетом экспериментальных данных по скорости коррозии в тех или иных условиях эксплуатации.



## Литература

1. *Cementitious Barriers Partnership / Overview of the U.S. Department of Energy and Nuclear Regulatory Commission Performance Assessment Approaches.* – Printed in the United States of America United State Department of Energy Office of Environmental Management. Washington, DC, 2009. 214 p.
2. *Kamaitis Zenonas.* Damage to Concrete Bridges due to Reinforcement Corrosion: Part II – Design Considerations // *Transport*, 2002. № 5. P. 163-170.
3. *СП 52-101-2003.* Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / Госстрой России. М.: ФГУП ЦПП, 2004. 54 с.
4. *Ландау Л.Д.* Теоретическая физика. В 10-ти т., т. VII. Теория упругости. М.: Наука, 1987. 248 с.