

УДК 691

Е.Е. Шалый¹, С.Н. Леонович², Л.В. Ким¹, Т.Е. Шалая¹

¹Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

²Белорусский национальный технический университет, г. Минск,

Белоруссия

МОДЕЛЬ ХЛОРИДНОЙ ДЕГРАДАЦИИ МОРСКИХ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация: Одним из условий долговечности морских сооружений является соответствие свойств материала конструкций природно-климатическим условиям района строительства. В статье приведены результаты исследований хлоридной деградации портовых сооружений о. Сахалин. Данные собраны при проведении контрольно-инспекторских обследований 8 причалов в портах Холмск и Корсаков. Определены причины и следствия коррозионного разрушения, рассчитаны вероятностные значения глубин проникновения хлоридов и карбонизации в зоне переменного уровня воды. Сравнение расчетных и измеренных величин показало хорошее соответствие.

Хлорид-индуцированная коррозия является одним из факторов снижения долговечности бетонных конструкций. Деактивация стали арматуры увеличивает коррозию, и соответственно уменьшает сечение, т.е. несущую способность арматуры. Сопротивление хлоридной агрессии зависит от проницаемости бетона и толщины защитного слоя. Хлориды поступают из морской воды (электролит) путем капиллярной транспортировки или ионной диффузии. Кислотные электролиты нейтрализуют нормальное щелочное состояние бетона ($pH > 12,6$), разрушают пассивную оксидную пленку на поверхности арматуры (рис. 1).



Рис. 1. Коррозия бетона лицевой стенки причала в порту Холмск [4]
Данный процесс формирования электрохимических ячеек на поверхности арматуры называется депассивацией (рис. 2).

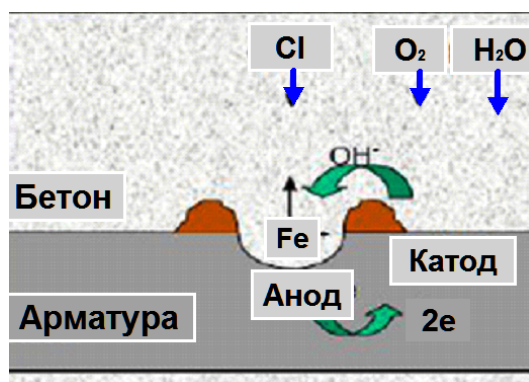
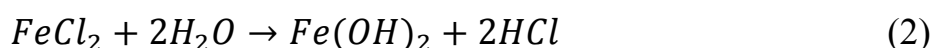
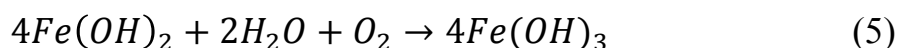
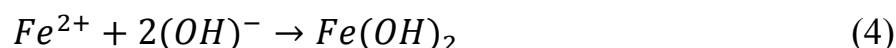


Рис. 2. Электрохимическая ячейка на поверхности арматуры

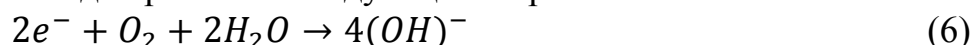
Уравнение реакции



Пассивированная область становится анодом, а пассивированная поверхность становится катодом



и реакция на катоде протекает следующим образом



Продукты коррозии в (4) и (5) значительно увеличиваются в объеме (до 6 раз), и вызывают растрескивание, расслаивание и отслаивание защитного слоя бетона. Процесс зависит от следующих факторов: коэффициента диффузии, концентрации хлоридов и критического уровня хлоридов [1-10]. Известно, что долговечность бетонной конструкции зависит больше от глубины защитного слоя, чем от коэффициента диффузии, и более от концентрации хлорида, чем от уровня хлоридов. Высокая влажность в бетоне может уменьшить диффузию кислорода до области коррозии и замедлить коррозию арматуры, в то время как нехватка воды снижает коррозионную активность (концентрации 0,4% по массе сухого цемента).

Диффузионное моделирование хлоридного раствора в бетоне получило развитие в 70-х годах [5]. После того, как критическое «пороговое» содержание хлорида достигает стали, разрушает ее пассивную оболочку, сталь начинает растворяться. Ионы растворенного железа реагируют с образованием продуктов коррозии, что вызывает растрескивание бетона. Использована модель деградации DuraCrete [5], основанная на концепции переноса хлорида в бетон путем диффузии и инициирования арматурной коррозии при превышении содержания активного хлорида на поверхности стали. Модель DuraCrete включает в себя формулировку предельного

состояния для инициирования коррозии, вызванной хлоридом, которая упрощается путем указания того, что отказ (то есть инициирование коррозии) происходит при

$$C > C_{crit}, \quad (7)$$

где C - содержание хлорида на поверхности армирования; C_{crit} - критическое содержание хлорида.

Критическое содержание хлорида является сложной функцией величин pH, объемов воды и кислорода, наличия пустот. Значение 0,4% хлоридного иона по массе цемента считается лучшим средним значением. Содержание хлорида в стали является зависимой от времени функцией

$$C_x = C_{sn} \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_a(t)t}} \right], \quad (8)$$

где C_x – содержание хлоридов на некоторой глубине в % от массы цемента; C_{sn} – поверхностное содержание хлоридов в % от массы цемента; x – глубина проникновения хлоридов, м; t – время воздействия, с; $D_a(t)$ – коэффициент диффузии хлоридов, м²/с.

Применение модели DuraCrete к практическим случаям является относительно новым. Исходными параметрами являются измеренное значение коэффициента диффузии 28-суточного бетона, а также содержание хлоридов на поверхности, глубина защитного слоя и их статистическое распределение. Polder R.B. [7] предложил два отклонения от модели DuraCrete и ее входных параметров. Одно отклонение касается коэффициента окружающей среды. Первоначальный расчет включает в себя тип цемента, окружающую среду и продолжительность периода твердения.

Gehlen [6] предложил коэффициент окружающей среды для бетона в морской среде, основанный только на температуре, которая использована нами применительно к морской среде эксплуатации

$$K_C = \exp \left[b_e \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_e} \right) \right] \quad (9)$$

где b_e - параметр регрессии; T_{ref} - эталонной температуры; T_e - среднегодовой температуры воздуха.

Им предложено отклонение относительно значения показателя старения 0,45 [11], учитывая, что для цементного бетона оно находится в пределах 0,6-0,8. Polder [7] назвал данную модификацию модели DuMaCon. Авторы провели верификацию модели на примере железобетонных конструкций причалов в портах Холмск и Корсаков. Бетон на сульфатостойком портландцементе с В/Ц=0,4 и расходом 450 кг/м³, толщиной защитного слоя 5 см. Результаты вероятностного расчета при сроке службы 40 лет см. табл. 1. Результаты вероятностного расчета сравнивались с измеренными величинами (табл. 2).

Таблица 1. Результаты вероятностного расчета

| Конструкция | Период эксплуатации | X, м | Содержание хлора, % |
|-------------------------|---------------------|------|---------------------|
| Зона переменного уровня | 40 лет | 10 | 0,293 |

| | | | |
|--|--|----|-------|
| | | 20 | 0,220 |
| | | 30 | 0,165 |
| | | 40 | 0,120 |
| | | 50 | 0,079 |

Таблица 2. Результаты обследования прибрежных конструкций о. Сахалин

| Элемент | Порт | Год | Цемент | Класс | Cl, % | h, см | Фото |
|-------------------------------|----------|------|----------------|-------|-------|-------|---|
| Причальная стенка | Холмск | 1980 | Портландцемент | XS3 | 0,149 | 1-10 |  |
| | | | | | 0,085 | 10-30 | |
| | | | | | 0,082 | 30-50 | |
| Причальная стенка | Корсаков | 1981 | Портландцемент | XS3 | 0,162 | 1-10 |  |
| | | | | | 0,094 | 10-30 | |
| | | | | | 0,080 | 30-50 | |
| Пешеходная эстакада (колонна) | Холмск | 1983 | Портландцемент | XS3 | 0,200 | 1-10 |  |
| | | | | | 0,115 | 10-30 | |
| | | | | | 0,069 | 30-50 | |
| Пешеходная эстакада (плита) | Холмск | 1983 | Портландцемент | XS3 | 0,253 | 1-10 |  |
| | | | | | 0,241 | 10-30 | |
| | | | | | 0,089 | 30-50 | |
| Надстройка пирса | Холмск | 1980 | Портландцемент | XS3 | 0,310 | 1-10 |  |
| | | | | | 0,254 | 10-30 | |
| | | | | | 0,012 | 30-50 | |
| Надстройка пирса | Корсаков | 1981 | Портландцемент | XS3 | 0,420 | 1-10 |  |
| | | | | | 0,260 | 10-30 | |
| | | | | | 0,013 | 30-50 | |

Результаты исследования показали, что используя данные вероятностного моделирования, можно относительно точно рассчитать срок службы бетона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Леонович С.Н. Алгоритм расчета долговечности железобетонных конструкций при хлоридной агрессии // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь: сб. тр. VII междунар. науч.-методич. семинара. Брест, БрГТУ, 2001. С. 432-435.
2. Леонович С.Н. Вероятностная оценка коррозии арматуры в существующих железобетонных конструкциях при хлоридной агрессии // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке кадров Республики Беларусь: сб. тр. VII междунар. науч.-методич. семинара. Брест, БрГТУ, 2001. С. 435-440.
3. Розенталь Н.К. О максимально допустимом содержании хлоридов в бетоне // Строительные материалы. 2017. С. 82-84.
4. Отчет по инженерно-экологическим изысканиям в Холмском морском торговом порту. Владивосток: ООО «ПриМорПроектБюро», 2015.
5. DuraCrete. Models for Environmental Actions on Concrete Structures // BE95-1347/R3, Project BE95-1347. Gouda, 1999.
6. Gehlen C. Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken, Deutscher Ausschuss for Stahlbeton, 510, Berlin, 2000.
7. Polder R.B., Visser J. Redistribution of chloride in blended cement concrete during storage in various climates // 3rd RILEM Workshop Testing and Modelling Chloride Ingress into Concrete. Eds C. Audrade, J. Kropp, 2004.